

# **Université Montpellier II**

Ecole Doctorale « Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie,  
Géosciences, Hydrosociences, Environnement »

**Mémoire présenté en vue d'obtenir**

**l'Habilitation à Diriger des Recherches**

**Modélisation des agroécosystèmes**

**de la simulation du fonctionnement sol-plante à celle des réseaux  
trophiques**

**Philippe Tixier**

Soutenue le 13 mai 2011, devant le jury composé de

Philippe Lucas	Directeur de recherche INRA	Rapporteur
Jean-Loup Nottéghem	Professeur Sup-Agro-Montpellier	Rapporteur
Jean Roger-Estrade	Professeur Agro-Paris-Tech	Rapporteur
Claire Lavigne	Chargée de recherche INRA	Examineur
Walter Rossing	Professeur Wageningen University Research	Examineur



CIRAD - Unité Propre de Recherche 26 – Systèmes de culture bananiers,  
plantains et ananas



## Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier François-Xavier Côte pour son soutien, pour les facilités mises à ma disposition dans son unité l'UPR26, et pour sa confiance depuis mon recrutement au Cirad. J'exprime également toute ma gratitude à Eric Malézieux qui, depuis mon travail de thèse, a su me conseiller et engendrer un dynamisme scientifique particulièrement fertile. Je remercie également Jacques Wéry, pour son encadrement lors de ma thèse et pour avoir partagé sa vision sur l'agronomie systémique.

La réalisation de ces travaux n'aurait pas été possible sans le soutien de la direction scientifique du CIRAD et notamment du département PERSYST, merci pour leur confiance et leur soutien, notamment par les financements de thèses.

Le travail présenté ici est le fruit de riches interactions au sein d'une équipe. Je remercie mes collègues Raphaël Achard, Frédéric Salmon, Pierre-François Duyck et Aude Ripoche pour la très bonne et très motivante ambiance 'dans l'annexe'. Merci notamment Pierre-François pour avoir partagé avec moi l'exercice de préparation du dossier d'HDR et pour m'accompagner dans l'aventure des réseaux trophiques. Merci à Aude pour ses relectures. Merci à tous pour leur aide et leurs qualités humaines.

Ce travail est également le fruit d'encadrement de travaux de recherche d'étudiants, avec lesquels il est si motivant de travailler. Je remercie en particulier Fabrice Vinatier, pour ces discussions fécondes autour du charançon et des modèles ainsi que pour son sérieux et ses qualités humaines.

Je témoigne toute ma gratitude à Françoise Lescourret pour avoir accepté la direction des thèses de Fabrice Vinatier et de Grégory Mollot, pour ces discussions si intéressantes sur les modèles et les liens entre agronomie et écologie. Je tiens également à la remercier pour sa précieuse aide dans la relecture et la structuration de ce dossier.

Mes remerciements s'adressent aussi à Patrick Quénéhervé pour son accueil au PRAM et pour le partage passionné de ses connaissances en nématologie et bien au delà.

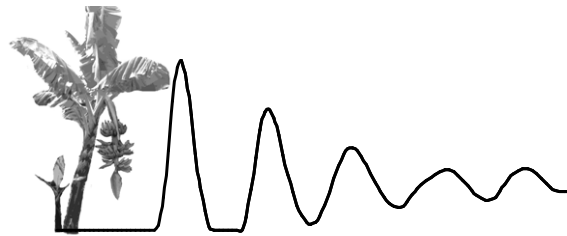


# Sommaire

<b>Remerciements .....</b>	<b>3</b>
<b><i>I. CURRICULUM VITAE .....</i></b>	<b>7</b>
<b>1. Parcours scientifique.....</b>	<b>9</b>
<b>2. Liste des publications .....</b>	<b>11</b>
<b>3. Activité d'encadrement.....</b>	<b>18</b>
3.1. Co-encadrement de thèses.....	18
3.2. Niveau Master 2.....	19
3.3. Niveau Master 1, Bac+4 .....	20
<b>4. Animation de la recherche .....</b>	<b>20</b>
<b><i>II. MEMOIRE DE TRAVAUX SCIENTIFIQUES .....</i></b>	<b>23</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>25</b>
<b>2. Comprendre et modéliser le fonctionnement biophysique des agroécosystèmes .....</b>	<b>27</b>
2.1. Fonctionnement du système sol-plante .....	27
2.1.1. Développement et dynamique des populations chez le bananier .....	27
2.1.2. Modélisation du bilan azoté des bananeraies .....	31
2.1.3. Modélisation des systèmes multi-espèces : cas des systèmes enherbés .....	31
2.2. Modélisation de l'épidémiologie des bioagresseurs .....	38
2.2.1. Dynamique des populations de nématodes des systèmes bananiers.....	38
2.2.2. Epidémiologie spatiale de <i>Cosmopolites sordidus</i> .....	42
<b>3. Evaluer et concevoir des systèmes de culture plus durables.....</b>	<b>47</b>
3.1. Des outils et méthodes d'évaluations des risques associés aux pesticides.....	48
3.2. Utiliser des modèles et des indicateurs pour assister la conception de systèmes de culture .....	51
3.2.1. Optimiser des pratiques culturales .....	53
3.2.1.1. Optimiser la conduite du peuplement cultivé .....	53
3.2.1.2. Optimiser les apports d'intrants pour maximiser leur efficience.....	54
3.2.2. Prototyper des systèmes de culture innovants.....	55
3.2.2.1. Une approche intégrée à l'échelle de la parcelle .....	57
3.2.2.2. Prise en compte des contraintes à l'échelle de l'exploitation .....	59
<b><i>III. PROJET DE RECHERCHE .....</i></b>	<b>61</b>
<b>1. Préambule .....</b>	<b>63</b>
<b>2. Vers une approche globale des processus écologiques dans les agroécosystèmes .....</b>	<b>65</b>
2.1. Des modèles de culture aux modèles d'agroécosystèmes .....	67
2.2. Les modèles de réseaux trophiques et la régulation des bioagresseurs .....	71
<b>3. Prendre en compte la dimension spatiale des interactions trophiques.....</b>	<b>73</b>
3.1. Comment intégrer les interactions trophiques dans les modèles de dispersion des bioagresseurs ? .....	75
3.2. Comment l'hétérogénéité spatiale des ressources basales des réseaux trophiques et l'hétérogénéité spatiale des populations influencent le contrôle des bioagresseurs ?.....	77
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>78</b>
<b><i>REFERENCES.....</i></b>	<b>79</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>85</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>86</b>



## **I. CURRICULUM VITAE**







## 1. Parcours scientifique

### Philippe TIXIER

<b>Nationalité :</b>	Française
<b>Date et lieu de naissance :</b>	27 août 1974 à Chambray les Tours (37), France
<b>Adresse professionnelle :</b>	CIRAD - PRAM BP 214 - 97285 Lamentin Cedex Martinique FRANCE Tel : 05 96 42 30 17 Fax : 05 96 42 30 01 Email : <a href="mailto:tixier@cirad.fr">tixier@cirad.fr</a>
<b>Profession :</b>	Chercheur, Docteur en sciences agronomiques
<b>Fonction actuelle :</b>	Chercheur en modélisation/agro-écologie dans l'Unité Propre de Recherche 26 – Systèmes de culture bananiers, plantains et ananas (UPR26), affecté au Pôle de Recherche Agro-environnementale de Martinique
<b>Organisme :</b>	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) Département PERSYST
<b>Compétences :</b>	Agronomie, étude des processus écologiques des agroécosystèmes Modélisation, intégration des connaissances Ecologie théorique, dynamique des populations, interactions trophiques, écologie isotopique
<b>Autres expertises :</b>	Participation à des congrès scientifiques, relecture d'articles Expertise sur des projets de développement et de recherche sur les filières des pays du sud, banane en particulier
<b>Région d'expertise :</b>	Caraïbes, Amérique centrale et Sud, Afrique de l'Ouest, Asie
<b>Formation :</b>	Docteur en sciences agronomiques (Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Université Montpellier 2), soutenue en décembre 2004 - mention très honorable DEA Fonctionnement physique, chimique et biologique de la biosphère continentale, Institut Agronomique Paris-Grignon, Ecole Normale Supérieure, Université Paris 6 - mention AB (1999)
<b>Compétences linguistiques :</b>	Français (langue maternelle) Anglais (courant), Espagnol (6 années)

**Expériences  
professionnelles :**

**2005-2010**

**CIRAD Martinique PRAM - UPR 26 Systèmes de culture  
bananiers, plantains et ananas**

**Chercheur - Agronome système**

- Modélisation des agroécosystèmes à base de bananiers (croissance, parasitisme, nutrition...)
  - Evaluation des risques environnementaux aux échelles de la parcelle et du territoire
  - Conception de systèmes de culture performants et non polluants
  - Mise au point d'outils de pilotage des systèmes de culture
  - Activités d'animation scientifique
  - Montages de projets de recherches
- 

**2001-2004**

**CIRAD FLHOR Guadeloupe – UMR SYSTEM**

**Doctorant**

- Conception d'outils de modélisation
  - Mise au point de méthodes assistées par modèles de prototypage de systèmes de culture plus durables
- 

**1999-2001**

**CIRAD FLHOR Guadeloupe - laboratoire agronomie et  
environnement**

**Volontaire à l'Aide Technique - Agronome**

- Etude des transferts de pesticides et des risques d'érosion (parcelle et bassin versant)
  - Mise au point d'indicateurs de risques environnementaux, traitement SIG, enquêtes de terrain
  - Aide au suivi agronomique de la station - Appui à la mise en place des premiers CTE de Guadeloupe
- 

**1999 (6 mois)**

**Laboratoire Ecologie, Systématique et Evolution -  
Université Paris 11 Orsay**

**Stage DEA**

- Etude de la longueur des réseaux trophiques des lacs alpins
- Utilisation de la méthode des isotopes stables de l'azote et du carbone
- Impacts de l'eutrophisation sur les écosystèmes lacustres

## 2. Liste des publications

Tableau récapitulatif des publications dans des revues à comité de lecture par année et par revue, classées par ordre d'Impact Facteur 2009 (JCR 2009)

Journal	IF 2008	Année						Total
		2004	2006	2007	2008	2009	2010	
Soil Biology and Biochemistry	2.98					1		1
Animal Behaviour	2.89						1	1
Journal of Agricultural and Food Chemistry	2.47			1				1
European Journal of Agronomy	2.42			1	1	1	1	4
Applied Soil Ecology	2.12						2	2
Agricultural Systems	2.11			1			1	2
Ecological Modelling	1.87	1	1			1		3
Agronomy for Sustainable Development	1.65					1		1
Agricultural and Forest Entomology	1.55						1	1
Crop Protection	1.33				1			1
Biosystem Engineering	1.10				1			1
Journal of Horticultural Science and Biotechnology	0.84						1	1
Methods in Ecology and Evolution	-*						1	1
Fruits	-						1	1
Total		1	1	3	3	4	9	21

\* Nouvelle revue de la *British Ecological Society*

**Les auteurs dont le nom est écrit en gras sont des étudiants que j'ai encadrés ou co-encadrés.**

### Articles dans des revues à comité de lecture (21)

P21. Tixier, P., Lavigne, C., **Alvarez, S.**, Gauquier, A., Blanchard, M., Ripoche, A., Achard, R., Model evaluation of cover crops, application to eleven species for banana cropping systems. European Journal of Agronomy, *in press*

P20. **Vinatier, F.**, Tixier, P., Duyck, P.-F., Lescourret, F., 2010. Factors and mechanisms explaining spatial heterogeneity: A review of methods for insect populations. Methods in Ecology and Evolution, *in press*

P19. **Vinatier, F.**, **Chailleux, A.**, Duyck, P.-F., Salmon, F., Lescourret, F., Tixier, P., 2010. Radio telemetry unravels movements of a walking insect species in heterogeneous environments. Animal Behaviour, 80, 221-229.

- P18. Chabrier, C., Tixier, P., Duyck, P.-F., Quénéhervé, P., 2010. Survival of the burrowing nematode *Radopholus similis* (Cobb) Thorne without food: why do males survive so long? *Applied soil Ecology*, 45, 85-91.
- P17. **Blazy, J.M.**, Tixier, P., Ozier-Lafontaine, H., Salmon, F., Thomas, A., Wery, J., 2010. BANAD: a dynamic bio-economic farm model for ex ante assessment of innovation adoption impacts. Application to banana's systems in Guadeloupe. *Soumis à Agricultural Systems*, 103, 221-232.
- P16. Tixier, P., Bugaud, C., **Duguet, R.**, Salmon, S., 2010. Effect of preharvest and postharvest application of calcium on banana green-life. *Fruits*, 65, 1-9.
- P15. Tixier, P., Salmon, S., Bugaud, C., 2010. Green Life of Pink Banana (*Musa* cv. Mossi): Determination of the Optimal Harvesting Date. *Horticultural Science and Biotechnology*, 85, 167-170.
- P14. Chabrier, C., Tixier, P., Duyck, P.-F., Carles, C., Queneherve, P., 2010. Factors influencing the survivorship of the burrowing nematode, *Radopholus similis* (Cobb.) Thorne in two types of soil from banana plantations in Martinique. *Applied soil Ecology*, 44, 116-123.
- P13. Rhino, B., Dorel, M., Tixier, P., Risède, J.M., 2010. Effect of fallows on population dynamics of *Cosmopolites sordidus*: toward integrated management of banana fields with pheromone mass trapping. *Agricultural and forest entomology*. 12, 195-202.
- P12. **Vinatier, F.**, Tixier, P., Le Page, C., Duyck, P.F., Lescourret, F., 2009. COSMOS, a spatially explicit model to simulate the epidemiology of *Cosmopolites sordidus* in banana fields. *Ecological Modelling*, 220, 2244-2254.
- P11. **Blazy, J.M.**, Dorel, M., Salmon, F., Ozier-Lafontaine, H., Wery, J., Tixier, P., 2009. Model-based assessment of technological innovation in banana cropping systems contextualized by farm types in Guadeloupe. *European journal of agronomy*, 31, 10-19.

- P10. Duyck, P.-F., Pavoine, S., Tixier, P., Chabrier, C., Quénéhervé, P., 2009. Host-range as an axis of niche partitioning in plant-feeding nematode community of banana agroecosystems. *Soil Biology & Biochemistry* 41, 1139-1145.
- P9. Houdart, M., Tixier, P., Lassoudière, A., Saudubray, F., 2008. Assess potential risk of pesticide pollution: from field to watershed. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 321-327.
- P8. Tixier, P., Salmon, S., Chabrier, C., Quénéhervé, P., 2008. Modelling pest dynamics of new crop cultivars: The FB920 banana with the *Helicotylenchus multicinctus*–*Radopholus similis* nematode complex in Martinique. *Crop Protection*, 27, 1427-1431.
- P7. Dorel, M., Achard, R., Tixier, P., 2008. SIMBA-N: modeling nitrogen dynamics in banana populations in wet tropical climate. Application to fertilization management in the Caribbean. *European Journal of Agronomy*, 29, 38-45.
- P6. Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., Wery, J., 2008. SIMBA: a comprehensive model for evaluation and prototyping of banana-based cropping systems. *Agricultural Systems*, 97, 139-150.
- P5. Tixier, P., Chabrier, C., Malézieux, 2007. Pesticides residues in heterogeneous plant populations. A model based approach applied to nematicides in banana. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55, 2504-2508.
- P4. Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., 2007. A Model-Based Approach to maximise Gross Income by Selection of Banana Planting Date. *Biosystems Engineering*, 6, 471-476.
- P3. Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., Bockstaller, C., Girardin, P. 2007. Rpest a dynamic indicator to assess pesticide water pollution risk. Application to banana-based cropping systems in FWI. *European Journal of Agronomy*, 26, 71-81.
- P2. Tixier, P., Malézieux, E., Risède, J-M., Dorel, M., 2006. Modelling populations of banana phytoparasitic nematodes: a contribution to the design of sustainable cropping systems. *Ecological Modelling*, 198, 321-331.

P1. Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., 2004. SIMBA-POP: a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. *Ecological Modelling*, 180, 407-417.

### **Articles soumis dans des revues à comité de lecture avec facteur d'impact (3)**

S3- **Vinatier, F.**, Tixier, P., Duyck, P.-F., Senoussi, R., Martin, O., Lescourret, F., Should I stay or Should I go? Evaluation of alternative dispersal kernels on individual movements, Soumis à *Ecology*

S2- Tixier, P., Côte, F.-X., Duyck, P.-F., Caron-Lormier, G., Malézieux, E., Toward Food-Web-Based Simulation in Agro-Ecology” Soumis à *Bioscience*

S1- Duyck, P.-F., **Lavigne, A.**, Vinatier, F., Achard, R., Tixier, P. Addition of a new resource in agroecosystems: do cover crops alter the trophic positions of generalist predators of the litter? Soumis à *Basic and Applied Ecology*

### **Articles dans des revues sans comité de lecture (3)**

Côte, F.X., Abadie, C., Achard, R., Cattan, P., Chabrier, C., Dorel, M., De Bellaire, L.D.L., Risède, J.M., Salmon, F. and Tixier, P., 2009. Integrated pest management approaches developed in the french west indies to reduce pesticide use in banana production systems. *Acta Horticulturae*, 375-382.

Tixier, P., 2006. Evaluation assistée par modèle des risques environnementaux à l'échelle de la parcelle : exemple des systèmes de culture à base de bananiers. *Les cahiers du PRAM*, n°6: 32-35.

Achard, R., Tixier, P., Thieuleux, L., Langlais, C., Lavigne, C., 2005. Du raisonné au biologique : convergence ou divergence ? Exemple des systèmes de culture bananiers, maraîchers et de l'arboriculture fruitière en Martinique. *Les cahiers du PRAM*, n°5: 55-60.

## Chapitre de livre (1)

Tixier, P., de Bon, H., 2006. Urban horticulture. In: René van Veenhuizen (Editor), Cities Farming for the Future - Urban Agriculture for Green and Productive Cities. RUAF Foundation, IDRC and IIRR. Leusden, 314-348. <http://www.ruaf.org/node/989>

## Communications orales dans des congrès internationaux (11)

Tixier, P., **Alvarez, S.**, **Blanchard, M.**, Ripoche, A., Achard, R. 2010. Evaluation of banana cover-cropping systems and model based selection of cover-crop species. Proceedings of 'Agro2010 the XIth ESA congress, Montpellier, August 29th – September 3rd , 2010, J. Wery, I. Shili-Touzi, A. Perrin (eds), Agropolis International Editions, Montpellier, France, p 157.

**Vinatier, F.**, Duyck, P.F., **Mollot, G.** and Tixier, P. 2010. Spatial ecology of *Cosmopolites sordidus* in banana field landscapes. In: J. Holland, M. van Helden, W. Rossing, M. Poehling, W. van der Werf, A. Ferguson and C. Lavigne (Editor), Landscape management for functional biodiversity. OIBC, Cambridge, England, pp. 139-142.

Quénéhervé, P., Achard, R., Tixier, P. 2009. New insights on nematode management on bananas in the Caribbean. In Second International Congress of Tropical Nematology, Maceio, Alagoas state, Brazil, October 4-9, 2009. Book of proceedings p 282.

Tixier, P., Duyck, P.-F., 2009. Linking cropping system and food web models to assess agroecosystem community stability. Example of litter macrofauna in banana systems. Congress of the International Society of Ecological Modelling. Laval University, Quebec City, PQ, Canada, 6-10, October, 2009. Book of proceedings, p 181.

Tixier, P., 2009. Using the SIMBA model to prototype and to optimize banana cropping systems. 8th Australian Banana Industry Congress, Gold Coast, Australia, June 4-6, 2009.

Tixier, P., 2008. Modelling nematode populations in horticultural systems. 5<sup>th</sup> International Congress of Nematology, 5ICN, Brisbane, Australia, July 13-18, 2008, book of proceedings' 350p.65.

Côte, F.X., Abadie-Fournier, C., Achard, R., Cattan, P., Chabrier, C., Dorel, M., de Lapeyre, L., Risède, J.M., Salmon, F., Tixier, P., 2007. How can pesticide use be reduced in banana culture? Approaches developed in the French West Indies: integrated production system development and cropping system design using modelling. In : ProMusa Symposium: Recent advances in banana crop protection for sustainable production and improved livelihoods / ISHS, 2007/09/10-14, White River, South Africa.

**Blazy, J.M.**, Carpentier, A., Ozier-Lafontaine, H., Thomas, A., Tixier, P., Wery, J., 2007. A new approach for integrated ex ante assessment of agro-management innovations by combining crop, farm, and adoption models. Farming System Design Congress, Catania, Italy, September 10-11, 2007, book of proceedings' Farm-regional scale design and improvement, 17-18.

Tixier, P., Malézieux, E., A Food web based model for cropping system simulation: a first application to banana systems. EcoSummit2007, Beijing, China, May 22-27, 2007, book of proceedings' 442p.247.

Dorel, M., Tixier, P., Archard, R., 2006. Management of banana nitrogen fertilization: taking into account nitrogen from organic origin. XVII international meeting of the cooperation in the research on banana in the Caribbean and tropical America. October, 15-20, 2006. Joinville, Santa Catarina, Brasil. Book of proceedings, 2, 634-637.

Tixier, P., 2006. Construction and calibration of a nematode population dynamics model: application to the management of plant-parasitic nematodes in bananas. In 'XXXVIII Organization of Nematologist of Tropical America – San Jose, Costa-Rica 26-31 July 2006, book of proceedings' Ciancio, A., Quénéhervé, P., Magunacelaya, J., C., Manzanilla Lopez, R., H., Kokalis Burelle, N., Inserra, R., N., Esquivel, A, Scurrah, M., editors, 84p. 40

Risède, J.-M., Dorel, M., Chabrier, C., Quénéhervé, P., Tixier, P., Jenny, C., 2005. Sustainable cropping systems for export banana in the French West Indies: A on-going reality that no longer remains elusive? [Texte intégral]. 1 p. 41ème Annual Meeting of the Caribbean Food Crop Society = 41ème Congrès annuel de la Société Caraïbe pour les Plantes Alimentaires, 10-16 juillet 2005, Gosier / CFCS, Guadeloupe. - s.l. : s.n., 2005, 2005-07-10/2005-07-16.



Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., 2004. Linking crop models and agro-environmental indicators : A new approach for the dynamic assessment of cropping systems. An application to banana cropping systems in the French West Indies. In 'VII European Society of Agronomy congress - Copenhagen Denmark: European agriculture in a global context, 15-19 July 2004, book of proceedings' Jacobsen, S-E., Jensen, C., R., and Porter, J., editors. 968p. 677-678.

### **Posters dans des congrès internationaux (8)**

**Vinatier, F.**, Tixier, P., 2010. Le mouvement d'un insect expliqué par les statistiques spatiales couplées à un modèle mécanistes. colloque d'écologie scientifique, 2-3 septembre 2010, Montpellier, France, p 394.

Tixier, P., Quénéhervé, P. 2009. Intra-root system heterogeneity of *Radopholus similis* population dynamics on banana, a modelling approach. In Second International Congress of Tropical Nematology, Maceio, Alagoas state, Brazil, October 4-9, 2009. Book of proceedings p 425.

Vinatier, F., Tixier, P., 2009. COSMOS, an individual-based model to improve spatial management of *Cosmopolites sordidus*. Congress of the International Society of Ecological Modelling. Laval University, Quebec City, PQ, Canada, 6-10, October, 2009. Book or proceedings, p 247.

Tixier, P., Salmon, F., Quénéhervé, P., 2008. Early assessment of pest dynamics on new crop varieties: a modelling approach applied to banana/nematode systems. 8<sup>th</sup> International Crop Science Congress, ICSC2008, Jeju, South Korea, April 13-18, 2008, book of proceedings' 296p.160.

**Vinatier, F.**, Tixier, P., Le Page, C., Bruchou, C., Duyck, P.-F., Lescourret, F., 2008. COSMOS, a spatially explicit model for epidemiology of banana weevil (*Cosmopolites sordidus*, Germar.). OILB congress, Avignon

Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., Cote, F.X., Wery, J., 2007. How to design a model for prototyping cropping systems? Example of SIMBA for banana-based systems. Farming System Design Congress, Catania, Italy, September 10-11, 2007, book of proceedings' Field-farm scale design and improvement, 251-252.

Tixier, P., Malézieux, P., Dorel, M., Ganry, J., Wery, J., 2006. Prototyping sustainable banana based cropping systems with the SIMBA model. In the 27th International Horticultural Congress, Seoul, Korea, August 2006.

Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., Wery, J., 2004. SIMBA: a comprehensive model for agro-ecological assessment and prototyping of banana based cropping systems. An application to the banana cropping systems in French West Indies. In the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, September 2004.

Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., 2004. Use of a cohort population model to simulate harvest dynamics in multi-cycle banana cropping systems. In the VI European Society of Agronomy congress, Cordoba, July 2001.

Malézieux, E., Dorel, M., Tixier, P., Ganry, J., 2004. Reintroducing agrobiodiversity to design more sustainable banana cropping systems in the French West Indies. In the VII European Society of Agronomy congress, Cordoba, July 2004.

### **3. Activité d'encadrement**

#### **3.1. Co-encadrement de thèses**

Marie Houdart (2003-2005) ED Université Antilles-Guyane, participation au travail du doctorant (publications) - Soutenance octobre 2005

Directeur de thèse : Pr Maurice BURAC (Université des Antilles et de la Guyane)

Titre : Organisation spatiale des activités agricoles et pollution des eaux par les pesticides, Modélisation appliquée au bassin-versant de la Capot, Martinique.

**→ 1 publication publiée avec le doctorant en premier auteur (P9)**

Jean-Marc Blazy (2005-2008) ED SIBAGHE, participation active au travail du doctorant - Soutenance décembre 2008

Directeur de thèse : Pr Jacques WERY (Sup-Agro-Montpellier)

Titre : Détermination *ex ante* des conditions d'adoption de systèmes de culture innovants :  
Cas des systèmes bananiers en Guadeloupe

→ 2 publications avec le doctorant en premier auteur (P11, P17)

Fabrice Vinatier (2007-2010) ED SIBAGHE, Encadrant principal – montage du projet de thèse

Directeur de thèse : Dr Françoise Lescourret (HDR, INRA Avignon), soutenance prévue le 18 novembre 2010

Titre : Modélisation de l'épidémiologie du charançon du bananier *Cosmopolites sordidus*.

Application à la conception de systèmes de culture durables aux Antilles françaises

→ 4 publications avec le doctorant en premier auteur, 3 publiées (P12, P19, P20) et 1 soumise (S3)

→ 1 publication soumise avec le doctorant en co-auteur (S1)

Grégory Mollot (2009-2012) ED SIBAGHE, Co-encadrant – montage du projet de thèse

Directeur de thèse : Dr Françoise Lescourret (HDR, INRA Avignon), encadrant principal Pierre-François Duyck (Cirad UR26)

Titre : Etude des régulations biologiques de *Cosmopolites sordidus* dans les réseaux trophiques des bananeraies, approches isotopiques et modélisation

### 3.2. Niveau Master 2

Anaïs Lavigne (2008) ; Agro-Campus-Ouest ; 3<sup>ème</sup> année de l'École Nationale Supérieure d'Horticulture et d'Aménagement du Paysage, équivalent Master Technologie du végétal et productions spécialisées,

Titre : Etude de la structure des réseaux trophiques des bananeraies antillaises par approche isotopique. Potentialités de régulation des bioagresseurs.

→ 1 publication soumise avec l'étudiant en co-auteur (S1)

Aude Laurens (2008) ; Agro-Paris-Tech, Master 2 Sciences et Technologies du Vivant,

Titre : Etude spatialisée des flux et du bilan de l'azote en bananeraie enherbée : optimisation de la gestion du couvert et de la fertilisation par modélisation

Anaïs Chailleux (2009) ; ENITA Bordeaux, Master 2 recherche spécialité protection des plantes et environnement,

Titre : Etude de la dynamique spatiale du charançon du bananier, *Cosmopolites sordidus* (Germar) par marquage RFID.

→ 1 publication avec l'étudiant en co-auteur (P19)

Rémy Kugalovski (2009) ; 3<sup>ème</sup> année de l'école d'ingénieur ENITA Bordeaux, équivalent Master Sciences et Technologies du Vivant,

Titre : Influence d'une gamme d'intensification de systèmes de culture sur le réseau trophique du charançon du bananier *Cosmopolites sordidus* (Germar).

### 3.3. Niveau Master 1, Bac+4

Claire Guillermet (2008) ; Sup-Agro-Montpellier, 2eme année de l'école d'ingénieur,

Titre : Evaluation économique des critères de sélection sur bananier.

Daphney Dagneau (2009) ; Agro-Paris-Tech, 2eme année de l'école d'ingénieur,

Titre : Effet de l'âge des bananeraies sur le réseau trophique du charançon du bananier (*Cosmopolites sordidus*), évaluation de son potentiel de régulation par approche isotopique.

Amélie Février (2009) ; Agro-Campus-Ouest, Master 1 STS mention Biologie, agronomie, santé, spécialité BioVIGPA (Biologie Végétale Itégrative : Gène, Plante, Agrosystème)

Titre : Evaluation de la fixation symbiotique d'azote par des légumineuses tropicales utilisables en plante de couverture.

Anne Vidie (2009-2010) ; AgroCampus Ouest - Rennes, 2eme année de l'école d'ingénieur,

Titre : Epidémiologie spatiale de *Cosmopolites sordidus* dans les jachères, approche par télémétrie RFID.

## 4. Animation de la recherche

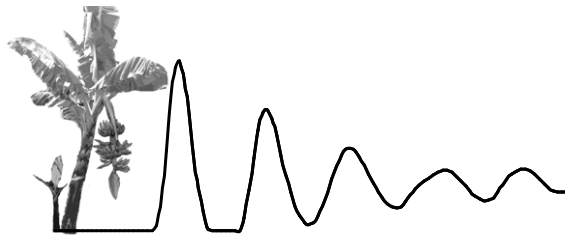
- Coordinateur du projet SYBAN (Systèmes de culture bananiers sans pesticides : conception et condition d'adoption aux Antilles Françaises) : projet du Ministère de l'Ecologie, de

l'Energie, du Développement durable et de la Mer (MEEDM) 2007-2010 (Partenaires : CIRAD-INRA-IRD-Cemagref).

- Coordinateur du montage du projet ANR MOSAIC «Analyse et modélisation de l'effet de l'organisation spatiale des systèmes de culture sur la dispersion et la régulation des bioagresseurs : développement d'outils génériques pour la conception de systèmes sans pesticide» - soumis en 2010, (partenaires : INRA-CIRAD-Agro-Paris-Tech).
- Coordinateur du projet de rapprochement INRA-CIRAD 2008-2010 Outils de modélisation spatialisée de l'épidémiologie des bioagresseurs appliqués à la conception des systèmes de culture. Analyse comparée du cas des systèmes bananiers et des vergers.
- Rédacteur d'un 'work-package' conception de système de culture des programmes opérationnels du Pôle de Recherche Agroenvironnemental de Martinique (PRAM), financements Feder et Feader.
- Participation Au projet ANR-PADD-010 - ADD Geduque (2005-2008) Innovations agro-écologiques et organisationnelles pour une Gestion Durable de la Qualité de l'Eau dans des régions de monoculture à forts niveaux d'intrants phytosanitaires
- Participation active au réseau Européen d'excellence ENDURE, notamment sur le 'study case banana' et 'landscape ecology'. Une semaine de cours à des doctorants européens donnée à la Summer School 2009 du réseau ENDURE 'Modelling approaches to support integrated pest management'.
- Animateur de l'axe de recherche 'épidémiologie des bioagresseurs' au sein de l'unité propre de recherche 'systèmes de culture bananiers plantain et ananas. L'unité de recherche Systèmes de culture Bananiers Plantains et Ananas a été évaluée A par l'AERES (Avril 2010).
- Montage et rédaction des sujets de thèse de Fabrice Vinatier et Grégory Mollot

- Evaluation de manuscripts : Agronomy for sustainable development, Agricultural and Food Chemistry, Agricultural Systems, Agricultural Water Management, Ecological Modelling, Environmental Toxicology and Chemistry, European Journal of Agronomy, Field Crop Research, Journal Tropical Biology.
- Enseignement Master Ecotrop, Université Antilles Guyane, Elaboration et conduite des agrosystèmes (10h)

## **II. MEMOIRE DE TRAVAUX SCIENTIFIQUES**







## **II. Mémoire de travaux scientifiques**

### **1. Introduction**

J'ai mené mes travaux de recherche successivement au laboratoire d'Ecologie Systématique et Evolution à l'université Paris Sud 11 (Orsay), lors de mon stage de DEA en 1999, puis en Guadeloupe et à Montpellier au CIRAD dans le cadre de ma thèse de Doctorat de 2001 à 2004. depuis avril 2005 je mène mes recherches au CIRAD au sein de mon unité l'UPR 'systèmes de culture bananiers, plantains et ananas' ; je suis affecté au Pôle de Recherche Agro-environnemental de la Martinique (PRAM). Ce parcours a été motivé par la volonté de traiter de sujets d'importance agronomique, avec des approches multidisciplinaires faisant notamment appel à des concepts d'écologie théorique. Mon intérêt pour les outils de modélisation m'a conduit à développer des approches intégratives, utilisées comme des outils collaboratifs, et à participer à des échanges entre chercheurs (spécialistes de disciplines différentes, ou chercheurs orienté vers les acteurs de la production agricole ou de la gestion de l'environnement). Je participe à répondre à des questions appliquées et fondamentales, à l'interface de l'agronomie et de l'écologie. Ces questions s'inscrivent dans le domaine de la durabilité des systèmes de culture. Mes travaux actuels portent sur le développement d'outils de simulation intégrant le fonctionnement des systèmes de culture innovants. Ces systèmes sont basés sur des pratiques d'intensification écologique (augmentation de la biodiversité pour favoriser des mécanismes écologiques se substituant à des pratiques utilisant des intrants chimiques).

L'approche de modélisation que j'ai privilégiée, permet d'intégrer les connaissances existantes sur le fonctionnement des agroécosystèmes, d'identifier les connaissances manquantes, de fournir des outils de pilotage et de permettre la définition de systèmes de culture raisonnés. Les relations de l'UPR26 avec les agriculteurs obligent à proposer des résultats qui doivent être transférables rapidement. Cela permet de faire émerger de nouvelles questions de recherches alliant théorie (comme la relation entre diversité biologique et fonctionnement des agroécosystèmes) et réalité de terrain (comme le pilotage des pratiques agricoles). Dans le cadre du développement durable de l'agriculture, les agronomes sont confrontés à des problèmes multidisciplinaires, leur résolution nécessite souvent une approche globale des pratiques agricoles et des agroécosystèmes. Il s'agit de concilier des objectifs à court et long terme, les impératifs économiques et environnementaux, les intérêts des agriculteurs et de leurs partenaires, les attentes des citoyens vis-à-vis du monde rural et les projets des sociétés locales (Meynard et al., 2001). Pour traiter ces questions, l'échelle de l'agroécosystème constitue une échelle privilégiée, du fait de son aspect intégrateur des processus

physiques, chimiques et biologiques. Le pilotage de l'agroécosystème par l'agriculteur représente le cœur de l'activité des agronomes 'systèmes' en intégrant l'analyse des situations culturales. L'étude des agroécosystèmes repose à la fois sur i) des recherches cognitives, visant à comprendre les processus impliqués dans l'agroécosystème et ii) sur l'intégration de ces processus afin d'évaluer ces systèmes de manière multicritère. Dans le cas des bananeraies, le caractère semi-pérenne du bananier favorise l'étude de l'agroécosystème aussi bien en terme de rotation culturale que d'études sur plusieurs années (il n'y a pas les contraintes des systèmes à base de plantes pérennes qui nécessitent des études sur des pas de temps beaucoup plus longs).

Cette partie de synthèse présente mes différents travaux avec un niveau croissant d'intégration, depuis les mécanismes physiques, chimiques et biologiques (à la base du fonctionnement de l'agroécosystème), jusqu'à une approche globale intégrant toutes ces composantes. L'échelle d'étude principale est la parcelle agricole. Au cours de mes travaux, j'ai privilégié des approches de modélisation *ad hoc*, souvent basées sur des concepts d'écologie. Dans la première partie de cette synthèse, je présente mes travaux sur la compréhension et la modélisation des mécanismes biophysiques impliqués dans le fonctionnement des agroécosystèmes. Ces mécanismes sont relatifs au fonctionnement sol-plante et aux dynamiques des populations de bioagresseurs. Dans la seconde partie de cette synthèse, je présente mes travaux sur l'évaluation et la conception de systèmes de culture. Ces travaux de conception de systèmes de culture s'appuient sur l'intégration des mécanismes présentés dans la première partie.

Dans la première partie de synthèse, je présenterai des travaux sur l'étude et la modélisation du fonctionnement biophysique des agroécosystèmes. Si j'ai coordonné la construction des outils de modélisation, les études des mécanismes ont été réalisées avec mes collègues de l'UMR System (en particulier Eric Malézieux) et de l'UPR26 (en particulier Marc Dorel, Jean-Michel Risède et Raphaël Achard). Sur l'étude des nématodes phytoparasites et de la dimension variétale des bananiers, j'ai collaboré avec Patrick Quénéhervé (IRD, UMR RPB) et de Frédéric Salmon (UPR 75). Sur les études d'épidémiologie spatiale (notamment dans le cadre de l'encadrement des thèses de Fabrice Vinatier et de Grégory Mollot), l'apport de Françoise Lescourret de L'INRA (UR PSH) a été très important. Enfin, la collaboration avec Pierre-François Duyck (UPR 26) a été décisive pour l'étude en écologie des communautés des bioagresseurs et des réseaux trophiques.

Dans la seconde partie de synthèse, je présenterai des résultats sur l'évaluation et la conception de systèmes de culture. Ces travaux ont été initiés au sein de l'UMR System par Jacques Wery et Eric Malézieux, puis pérennisés dans l'UPR 26 n(avec le soutien de François-Xavier Côte et Marc Dorel). Ensuite le développement d'outils plus spécifiques a fait l'objet d'une collaboration avec Philippe Girardin et Christian Bockstaller de l'INRA (UMR Agronomie-Environnement).

L'évaluation du risque de pollution par les pesticides à l'échelle du territoire s'est faite dans le cadre de la thèse de Marie Houdart. L'étude du fonctionnement de l'exploitation agricole dans le cadre de la thèse de Jean-Marc Blazy s'est faite en collaboration avec Jacques Wery (UMR System) et Hary Ozier-Lafontaine (INRA, UR APC).

## **2. Comprendre et modéliser le fonctionnement biophysique des agroécosystèmes**

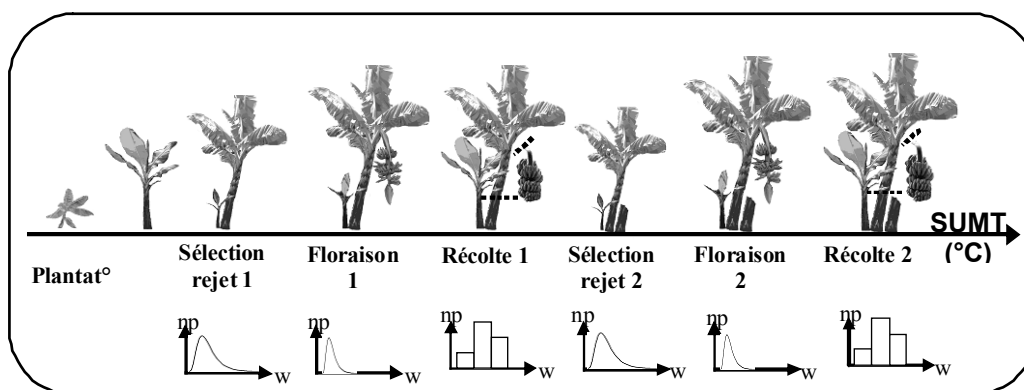
### **2.1. Fonctionnement du système sol-plante**

La compréhension du fonctionnement des agroécosystèmes repose largement sur l'étude des mécanismes de croissance des plantes cultivées. Les mécanismes du système sol-plante sont à la base du fonctionnement écologique (production primaire, cycles biogéochimiques) et des performances agronomiques (rendement). La spécificité de mes travaux porte sur l'analyse du fonctionnement du système sol-plante en conditions tropicales dans le cas d'une plante semi-pérenne.

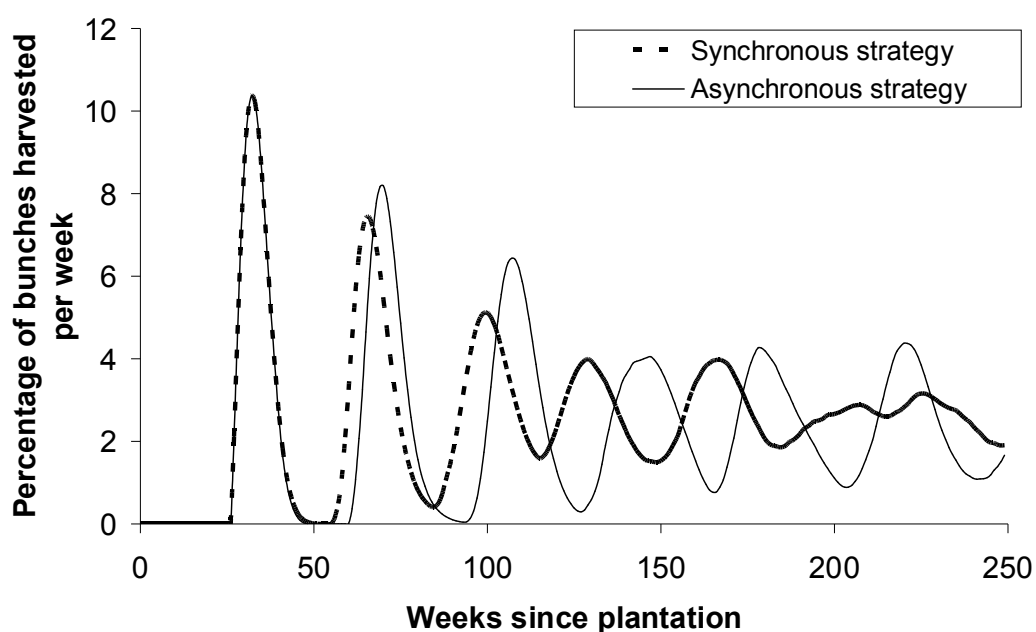
#### **2.1.1. Développement et dynamique des populations chez le bananier**

Publications P1 (P : publié ; S : soumis)

Les écosystèmes naturels tropicaux sont souvent caractérisés par une faible saisonnalité des processus écologiques (les paramètres climatiques y sont relativement constants) à la différence de la forte saisonnalité observée dans les milieux tempérés. Ce caractère est également présent dans le champ cultivé des milieux tropicaux où les cycles des cultures peuvent débuter et se terminer à presque toutes les périodes de l'année. Ce phénomène est renforcé dans le cas d'une espèce semi-pérenne comme le bananier ; sur une parcelle, chaque plante se développe à son propre rythme et le peuplement tend à se désynchroniser progressivement après la plantation. Cela engendre une complexité accrue avec la présence simultanée sur une parcelle de plantes de stades phénologiques différents. Les modèles de cultures utilisés en agronomie pour simuler le développement et la croissance des plantes cultivées reposent sur l'hypothèse d'homogénéité de stade du couvert.



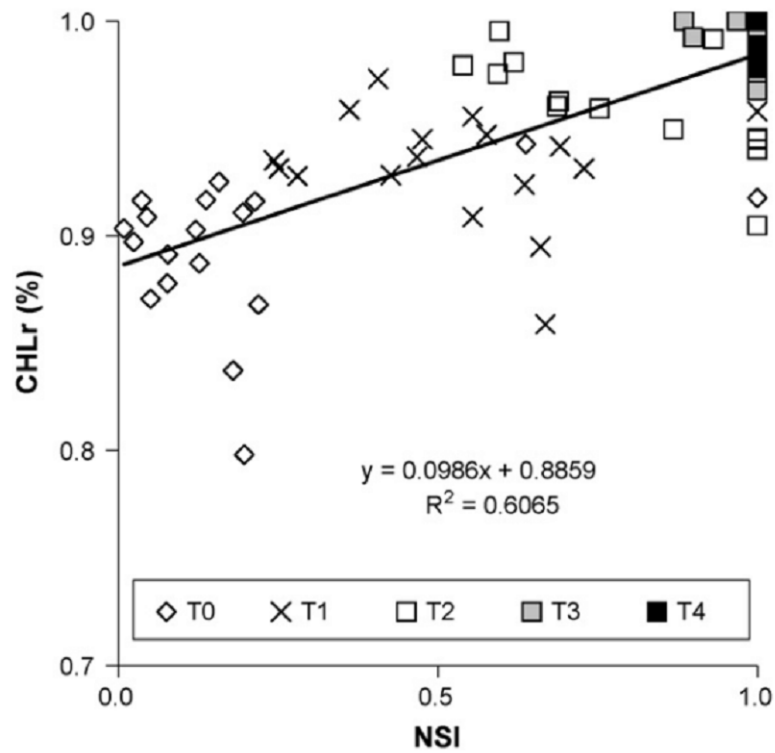
**Fig. 1.** Stades de développement du bananier en fonction des sommes de températures accumulées et loi statistiques associée à l'apparition de chaque stade de floraison, apparition du rejet et de récolte, d'après P1.



**Figure 2.** Simulation de la dynamique des récoltes de régimes de bananes sur une parcelle (en % du nombre de régimes récoltés par cycle) pour deux stratégies de sélection du rejet, favorisant l'homogénéité du peuplement (stratégie synchrone) et favorisant la sélection précoce du rejet mais désynchronisant plus rapidement le peuplement (stratégie asynchrone) d'après P1.

Les principaux modèles de culture STICS (Brisson et al., 1998; Brisson et al., 2002), CROPSYST (Stöckle et al., 2003), DSSAT (Jones et al., 2003), ou APSIM (Keating et al., 2003) sont basés sur cette hypothèse et par conséquent ne sont pas adaptés à la simulation de couverts hétérogènes courants en milieux tropicaux. La simulation d'un peuplement et non d'une plante moyenne est un des concepts importants dans la simulation à long terme des systèmes de culture bananiers. Sur une parcelle, le développement de chaque plante (**figure 1**) se fait de manière individuelle, menant à la désynchronisation du peuplement. C'est cette dynamique des populations de bananiers à l'échelle d'une parcelle qui explique en grande partie les dynamiques du système (récolte, restitution de résidus, parasites, eau dans le sol,...). Ainsi, le cycle de l'azote (prélèvements et restitutions) et la dynamique des racines (ressources pour les nématodes phytoparasites) sont largement dépendants du fonctionnement du peuplement de bananiers. Un modèle a été développé pour simuler la structure de la population d'une parcelle de bananiers sur le long terme. Ce modèle SIMBA-POP (**P1**) est basé sur une structure en chaîne de cohorte. Chaque cohorte représente l'effectif des individus (les bananiers) ayant le même stade de développement. Le rang de chaque cohorte traduit son âge en semaines et la somme des températures associées traduit son âge physiologique. Des lois statistiques permettent (en fonction des sommes de températures accumulées par chaque cohorte) le contrôle du passage des bananiers de la chaîne de cohortes de préfloraison à la chaîne de cohortes de post-floraison, puis le passage au stade récolte. Ce modèle de simulation de la population de plantes est au cœur de la modélisation des systèmes de culture bananier développé (modèle SIMBA). Il a permis de tester au niveau du peuplement de bananiers des pratiques de gestion des rejets qui impactent aussi bien la production (nombre de régimes récoltés par an) que la synchronisation des récoltes (**figure 2**).

Cette innovation dans le domaine de la simulation des peuplements cultivés complexes ouvre la voie à une nouvelle génération de modèles de simulation agronomique, se rapprochant des modèles de foresterie tropicale (Pascual et al., 2008). La simulation d'un peuplement hétérogène implique de repenser les modèles de simulation de sa croissance en biomasse. J'ai abordé cette question en couplant un module de croissance indépendant pour chaque cohorte simulée. Cette structure, beaucoup plus lourde au niveau informatique (non limitative au niveau de la rapidité d'exécution des simulations) permet la prise en compte de processus stade-dépendant. Par exemple les stress de croissance à un instant donné, associés aux bioagresseurs ou à l'alimentation minérale, ne s'exprimeront pas de manière identique selon les différents individus du peuplement simulé.



**Figure 3.** Relation entre l'indicateur NSI de satisfaction de la plante simulé avec le modèle SIMBA-N et la mesure de la teneur en chlorophylle des feuilles de bananiers (CHLr), d'après P7.

### **2.1.2. Modélisation du bilan azoté des bananeraies**

Publications P7 (P : publié ; S : soumis)

Les cycles de l'eau et de l'azote sont majeurs dans le fonctionnement biophysique des agroécosystèmes. La modification de ces cycles est à la base de l'agriculture moderne. Dans des conditions tropicales humides, les mécanismes de lessivage et de minéralisation de la matière organique du sol et des résidus de culture sont plus importants que dans des conditions tempérées (température et pluviométrie plus élevées). Dans le cas des systèmes de culture bananiers destinés à l'export, le cycle de l'azote présente à la fois les caractéristiques de systèmes de culture intensifs avec des apports importants, et un fonctionnement global se rapprochant d'écosystèmes naturels de type forestier (fonctions de recyclage importantes et dynamiques de prélèvement par une population de plantes complexe et hétérogène). Ce constat m'a amené à développer, en collaboration avec les agronomes de mon unité de recherche, un module de simulation prenant en compte ces spécificités et visant à simuler la dynamique de l'azote dans le sol et dans le couvert végétal. Le modèle développé SIMBA-N (**P7**) intègre ces spécificités liées aux conditions tropicales et au fonctionnement semi-pérenne de la plante. La structure de ce module de simulation comprend les différents stocks d'azote du sol et du couvert végétal. Les équations régissant les flux entre ces stocks intègrent les spécificités du système simulé (équations de dégradation des résidus de culture permettant de différencier la minéralisation des différentes classes d'âge de résidus). Ce module a été utilisé pour optimiser les pratiques de fertilisation ou pour simuler le fonctionnement global de l'agroécosystème. Ce modèle a permis de définir des indicateurs de satisfaction de la nutrition azotée de la plante. Ainsi, l'indicateur NSI (Nitrogen Satisfaction Index) basé sur la teneur en azote minéral du sol des quatre dernières semaines est bien corrélé à la teneur en chlorophylle de la plante, qui traduit un niveau de satisfaction de la demande de la plante en azote (**figure 3**).

### **2.1.3. Modélisation des systèmes multi-espèces : cas des systèmes enherbés**

Publications P21 (P : publié ; S : soumis)

Dans la perspective de développer des systèmes de culture plus durables, l'intégration de biodiversité dans le champ cultivé est un des nouveaux paradigmes de la communauté des



**Figure 4.** Exemple d'association bananiers-plantes de couverture, ici des graminées (photographie Raphaël Achard)

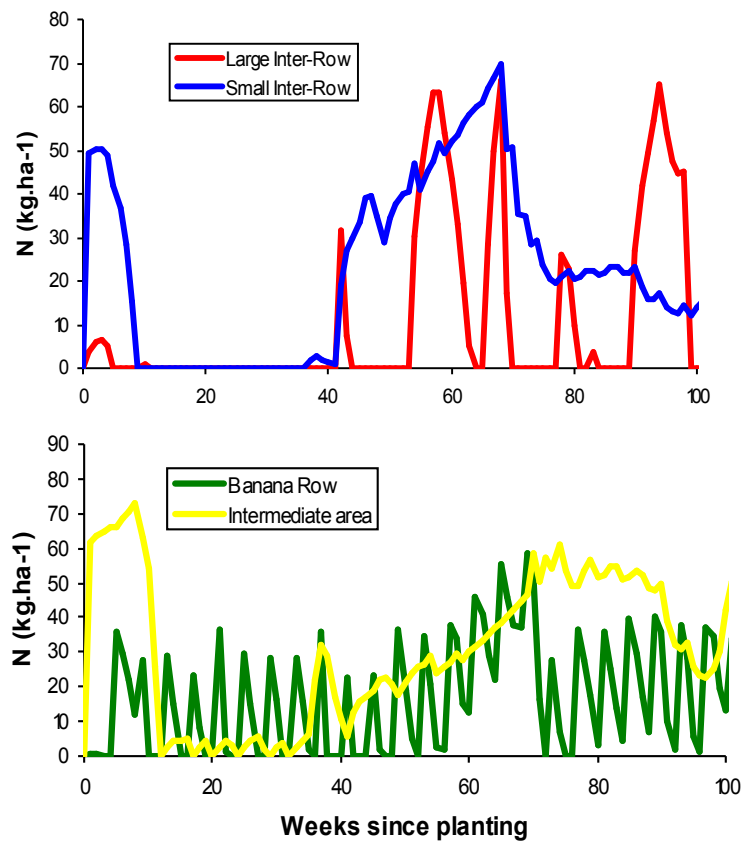


agronomes (Altieri, 1989). Cette biodiversité doit permettre de rétablir des services écosystémiques relatifs notamment à la fermeture des cycles biogéochimiques et aux équilibres entre communautés imitant le fonctionnement des écosystèmes naturels (Ewel, 1999). Parmi les moyens d'augmenter la diversité dans le champ cultivé, citons l'intégration de plantes de couverture, les associations culturales (comme dans les systèmes d'agroforesterie), la réduction des herbicides favorisant la flore adventice, et la mise en place d'îlots de biodiversité tels que des bordures de parcelles. Cependant, l'ajout d'un élément de biodiversité dans un système de culture intensif n'est pas toujours aisé ; il est susceptible de remettre en cause les performances agronomiques (en créant des compétitions pour les ressources hydriques ou minérales) ou d'avoir des effets contraires à ceux visés (provoquant par exemple des pullulations de maladies ou ravageurs).

Les systèmes innovants de culture doivent mobiliser des processus écologiques afin de remplir des fonctions, devant se substituer à des pratiques basées sur l'utilisation d'intrants issus de l'industrie chimique (engrais ou pesticides). Ces processus sont souvent renforcés par l'ajout d'éléments de biodiversité organisés au sein du système de culture. Des plantes de couverture pourront remplir différentes fonctions : couvrir le sol pour lutter contre les adventices, fixer de l'azote atmosphérique qui se substituera à des apports d'engrais, ou participer à la prophylaxie contre les bioagresseurs. La présence d'une plante de couverture complexifie le système de culture. Au niveau du fonctionnement sol-plante, ces plantes associées modifient fortement les flux d'eau et d'éléments minéraux. Il est donc nécessaire de comprendre le fonctionnement biophysique de ces systèmes en association pour limiter l'impact négatif des plantes de couverture sur la croissance de la plante cultivée (compétition pour les ressources minérales) et pour maximiser les fonctions visées (couverture du sol, compétition avec les adventices, fixation de l'azote). La compréhension de ces phénomènes s'inscrit dans l'étude et la modélisation des systèmes multi-espèces dont les fondements sont principalement définis à partir des systèmes agro-forestiers (Malézieux et al., 2008). De tels systèmes sont actuellement développés dans de nombreuses cultures pérennes telles que la vigne (Ripoche et al.), les arbres fruitiers et vergers (Ramos et al.).

### **L'ajout d'une plante de couverture structure le fonctionnement sol-plante**

L'intégration de diversité végétale dans le champ cultivé est appliquée aux systèmes de culture bananiers, en vue de limiter l'usage des herbicides. Elle est au cœur du projet MEEDM SYBAN (Systèmes de culture bananiers sans pesticides : conception et conditions d'adoption aux Antilles Françaises 2007-2010) que je coordonne. Dans le cas de l'association bananiers-plantes de couverture, la question centrale adresse la compétition pour l'azote entre plantes cultivées et plantes associées.

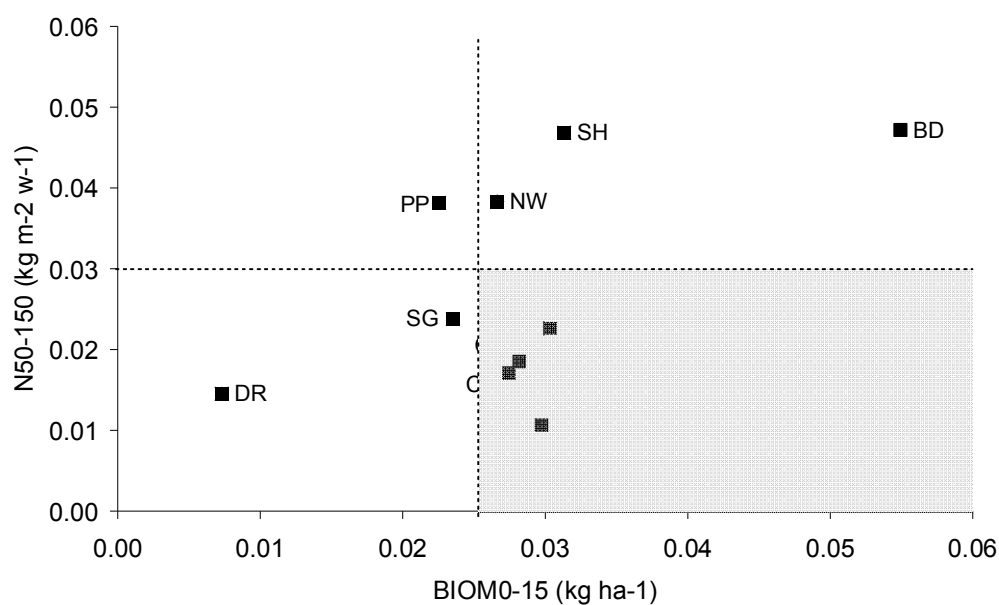


**Figure 5.** Exemple de simulation de la dynamique de l'azote minérale dans le sol pour quatre zones d'une association bananiers-plantes de couverture avec le modèle SIMBA-IC.

Les plantes de couverture actuellement testées sont des graminées, non-fixatrices d'azote (**figure 4**). Dans ce contexte, les outils de modélisation doivent permettre d'appréhender cette compétition pour l'azote du sol entre plante de couverture et culture principale, et d'aider à la conception de pratiques culturales limitant les effets de cette compétition. Parmi ces pratiques culturales, le pilotage dans le temps et l'espace de cette plante de couverture est très important. Les modèles de simulation doivent intégrer cette dimension. Le modèle de simulation du bilan azoté des bananeraies SIMBA-N a été spatialisé en prenant en compte quatre zones de la bananeraie ayant des fonctionnements hydrique et minéral bien distincts. Ce travail, réalisé dans le cadre du stage d'Aude Laurens (Laurens, 2008), a permis de définir la structure du modèle spatialisé SIMBA-IC qui intègre trois mécanismes pour chaque zone simulée : la croissance de la plante de couverture, le bilan hydrique (qui prend en compte la redistribution de l'eau par le bananier), et les prélèvements d'azote minéral différentiels selon les zones. Ce dernier point est particulièrement complexe ; selon le stade de développement des bananiers, le système racinaire a une étendue variable, modifiant les zones explorées. De plus, les prélèvements de la culture sont également dépendants de la disponibilité en azote dans le sol. Nous avons développé un formalisme permettant de prendre en compte des règles d'allocation de l'azote du sol vers la plante de couverture et vers le bananier. *In fine*, le modèle spatialisé a permis de tester l'effet de la plante de couverture sur la croissance des bananiers et sur des variables d'état comme la teneur en azote dans les différentes zones de la bananeraie (**figure 5**). Les principales perspectives de cette activité de recherche sont une meilleure compréhension des mécanismes de prélèvement des éléments minéraux des plantes dans le sol et des mécanismes d'immobilisation et de recyclage de l'azote *via* la biomasse microbienne et les différents résidus de culture et de plantes de couverture.

### **Sélection de plante de couverture assistée par modèle**

L'autre question scientifique centrale dans le développement de systèmes de culture intégrant des plantes de couverture concerne le choix des espèces associées à la culture principale. Nous avons développé une méthode originale aidant à la sélection de plantes de couverture. Il s'agit d'utiliser un modèle de simulation facilitant la sélection des plantes de couvertures, maximisant les fonctions recherchées (couverture du sol, compétition avec les adventices), et minimisant la compétition pour les ressources minérales avec la plante cultivée.



**Figure 6.** Exemple d'évaluation *ex-ante* de 11 espèces de plantes de couverture sous un couvert de bananier. BIOM0-15 représente la biomasse moyenne de la plante de couverture pendant les 15 premières semaines et N50-150 représente la demande en azote après la phase entre les semaines 50 et 150 après le semi. Ces deux indicateurs sont utilisés pour évaluer respectivement la capacité de compétition vis-à-vis des adventices et des bananiers. Les espèces dans le quadrant grisé sont les plus favorables à l'association avec les bananiers, d'après P21.

Le module SIMBA-CC (de croissance de plante de couverture) a été paramétré pour une vingtaine d'espèces de plantes de couverture. Ce module utilise un nombre minimal de paramètres directement mesurables à partir de mesures en micro placettes. Les variables de sorties sont, à chaque pas de temps, la biomasse et la surface foliaire de chaque plante de couverture pour des conditions climatiques données. Ce module reprend les grands principes de la croissance des plantes sur la base de l'interception du rayonnement selon la loi de Beer-Lambert. La dernière étape de la sélection assistée par modèle consiste à 'contextualiser' la croissance de chaque plante de couverture dans des conditions de rayonnement correspondant à un site donné et en prenant en compte la variation d'interception d'une partie du rayonnement par le couvert de bananiers. Des indicateurs des fonctions recherchées sont définis : compétition vis-à-vis des adventices (biomasse moyenne dans les premières semaines de la simulation), compétition limitée vis-à-vis des bananiers (azote nécessaire à la croissance de la plante de couverture), et capacité à persister sous l'ombrage des bananiers (biomasse après plusieurs cycles de culture). La **figure 6** présente un exemple de ces indicateurs, permettant de sélectionner les espèces les plus prometteuses pour l'association avec des bananiers. Bien que certains processus susceptibles de modifier l'interaction entre plantes cultivées et plantes de couverture ne soient pas pris en compte (comme les phénomènes d'allélopathies ou de fixation symbiotique de l'azote par les plantes légumineuses), ces simulations permettent d'éliminer les plantes les moins adaptées. Enfin, le module SIMBA-CC est utilisé pour rechercher les traits fonctionnels de plantes de couverture virtuelles les mieux adaptés à l'association avec le bananier. Ces recherches s'inscrivent dans le domaine de l'écologie végétale par traits fonctionnels, elles visent à prédire la capacité colonisatrice des plantes à partir de traits fonctionnels associés à l'interception lumineuse (Violle et al., 2009).

Le domaine de la simulation du système sol-plante dans le cas d'agroécosystèmes plus diversifiés au niveau des assemblages de plantes cultivées ou associées reste encore à construire. Dans des systèmes complexes, les modèles basés sur la simulation d'une plante moyenne et l'hypothèse d'homogénéité spatiale des processus ne sont plus ni suffisants ni valides. La prise en compte de peuplements de plantes, ayant des traits fonctionnels divers et interagissant dans un milieu rendu hétérogène sera nécessaire pour apporter des solutions à la compréhension du fonctionnement de systèmes de culture écologiquement complexes. Dans le cadre de recherches visant à concevoir des systèmes de culture durables, les recherches devront se concentrer sur l'étude par modèle de traits fonctionnels associés aux performances agronomiques de l'association (ils pourront être étendus à des traits fonctionnels associées à la dynamique des bioagresseurs ou des communautés régulatrices). Ces points seront discutés dans la partie projet de ce document.

## 2.2. Modélisation de l'épidémiologie des bioagresseurs

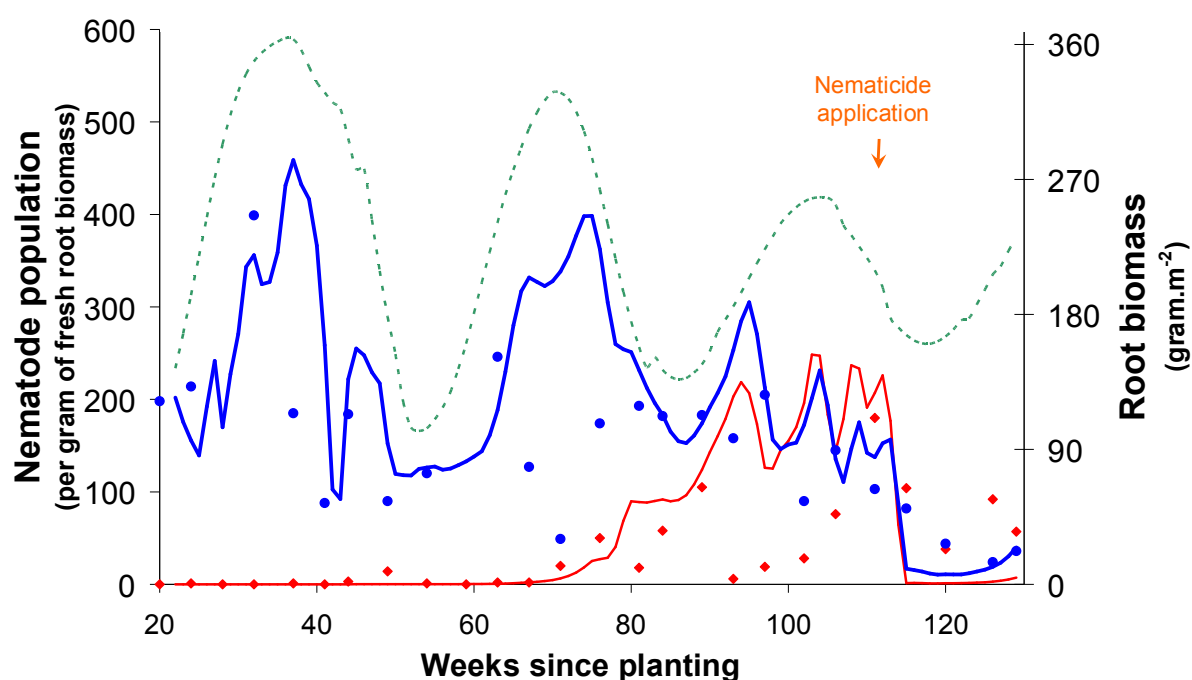
### 2.2.1. Dynamique des populations de nématodes des systèmes bananiers

Publications P2, P8, P10, P14, P18 (P : publié ; S : soumis)

Comme dans beaucoup d'agroécosystèmes, les monocultures de bananiers sont le siège du développement de nombreux bioagresseurs (nématodes phytoparasites, insectes phytophages, maladies fongiques aériennes) qui réduisent considérablement la durabilité de ces systèmes ; i.e. baisse du rendement, pollution de l'environnement par les pesticides utilisés. Dans les bananeraies, il existe une grande variété d'espèces de nématodes phytoparasites, avec des niveaux très différents d'affinité pour leurs hôtes et de dégâts occasionnés. *Radopholus similis* and *Pratylenchus coffeae* sont les deux nématodes qui provoquent le plus de dégâts sur le système racinaire des bananiers, provoquant des nécroses des racines, réduisant la capacité de prélèvement en eau et en éléments minéraux par la plante. Lorsque ces nécroses sont trop importantes les bananiers tombent entraînant alors d'importantes pertes. Actuellement, la prise en compte de la dynamique des bioagresseurs de manière explicite dans les modèles de simulation des systèmes de culture est rare. Elle est souvent implicitement prise en compte avec une dynamique standard et forcée, représentant les populations de bioagresseurs au cours du cycle de culture (Savary et al., 2006). Cette approximation est possible en milieu tempéré, où la vernalisation réinitialise les populations. En milieu tropical, avec des plantes pérennes ou semi-pérennes, cette approximation n'est pas possible ; la dynamique des populations de bioagresseurs ne suit pas un 'pattern' simple et dépend de l'ensemble des paramètres climatiques, des pratiques culturales tout au long de la culture, et des équilibres entre populations. Par conséquent, il est donc nécessaire dans ce cas d'appréhender la dynamique des bioagresseurs de manière dynamique et sur le long terme.

Le modèle SIMBA-NEM a été développé en collaboration avec les équipes de nématologie de Guadeloupe et de Martinique afin de simuler la dynamique des nématodes phytoparasites du bananier (**P2**). Ce modèle est en interaction avec les autres éléments simulés (dynamique des racines de bananier, facteurs pédoclimatiques, interactions entre les différentes espèces de nématodes). Dans ce modèle, chaque espèce de nématode est représentée par une chaîne de cohortes (une cohorte représente un stade de développement des nématodes). La reproduction des

nématodes suit une loi de type logistique, prenant en compte la fécondité de chaque espèce et la capacité de charge de l'environnement. Cette capacité de charge de l'environnement dépend de la ressource racinaire disponible (biomasse simulée par le module 'plante'). Cette ressource est partagée entre les différentes espèces de la communauté de nématodes. Ce modèle a été validé pour des dynamiques complexes des populations de nématodes (**figure 7**) ; il permet aujourd'hui d'envisager son utilisation pour une gestion raisonnée des peuplements limitant l'emploi des pesticides. Il constitue une tentative (assez rare) de lien opérationnel entre les connaissances des pathologistes et celles des agronomes pour la création d'un outil de représentation conjointe des dynamiques couplées des parasites et des plantes cultivées. Des analyses issues de la thèse de Christian Chabrier (Université des Antilles et de la Guyane, 2008) sur la survie des nématodes dans le sol (**P14, P18**) et sur leur dissémination à l'échelle d'un réseau de parcelles justifieraient de prendre en compte la dimension spatiale dans le modèle SIMBA-NEM. Cela permettrait de simuler les contaminations entre parcelles. *In fine*, il s'agirait d'étendre cet outil à un niveau d'organisation supérieur (paysage), pour une gestion optimisée des peuplements et une appréhension des risques à cette échelle spatiale.



**Figure 7.** Exemple de simulation réalisé avec le modèle SIMBA-NEM, comparaison avec des données de terrain ; *Radopholus similis* en rouge, *Pratylenchus coffeae* en bleu, biomasse racinaire en vert, d'après P2.

## **Orienter les communautés de nématodes phytoparasites par les plantes hôtes**

Une autre voie de réduction des dommages des nématodes phytoparasites consiste à orienter la communauté des nématodes phytoparasites se développant sur une parcelle. Nous avons montré que la niche écologique des principales espèces de nématodes phytoparasites était structurée par les plantes adventices (**P10**). Les plantes présentes sur une parcelle (adventices ou associées) structurent la communauté des nématodes phytoparasites. Chaque plante hôte est susceptible de favoriser une ou plusieurs espèces de nématodes. En sélectionnant des espèces de plantes associées qui favorisent des espèces de nématodes peu dommageables pour la plante cultivée mais qui sont des compétiteurs des espèces de nématodes les plus dommageables, il devrait être possible de favoriser une structure de communauté des nématodes moins dommageable pour la plante cultivée. Ces approches s'inscrivent dans l'application pratique du concept de partage de niche. Dans le cas de la structuration des nématodes phytoparasites par les plantes hôtes, cette séparation de niche est la plus marquée pour trois espèces de nématodes considérées comme établies depuis longtemps en Martinique. Ceci est en accord avec le fait que ces espèces ont probablement été en contact pendant une longue durée et ont pu co-évoluer. Au contraire, il y a peu de potentiel pour une partition de niche entre les espèces envahissantes récentes (*Radopholus similis* et *Helicotylenchus multicinctus*).

## **Relation génotype – dynamique de bioagresseurs**

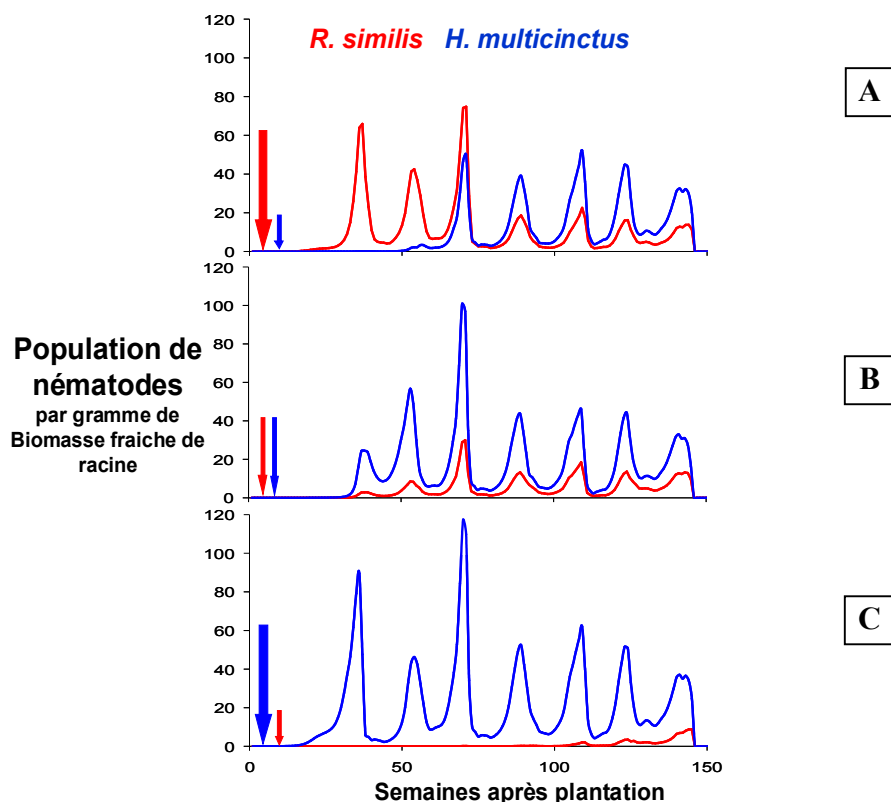
La composante variétale des plantes cultivées a toujours représenté un important levier d'innovation dans les systèmes de culture. Bien qu'il existe une grande diversité naturelle de bananiers, les cultures pour l'exportation sont basées sur un nombre extrêmement restreint de cultivars. Ce caractère monoclonal s'explique par la quasi-stérilité naturelle des bananiers cultivés. Toutefois, le CIRAD développe un programme de croisement qui donne naissance à de nouvelles variétés de bananiers aux caractéristiques très différentes des Cavendish cultivées actuellement (morphologie, phénologie, croissance, résistance ou tolérance aux bioagresseurs). Ces variétés, initialement sélectionnées pour leur résistance aux cercosporioses (cercosporiose jaune et maladie des raies noires, causées respectivement par *Mycosphaerella musicola* et *M. fijiensis*) sont pour la plupart de moins bons hôtes des principaux nématodes phyto-parasites que les bananiers du groupe Cavendish actuellement cultivés. En collaboration avec l'équipe de généticien-sélectionneurs du programme d'amélioration des bananiers du CIRAD et de l'équipe IRD Martinique de nématologie, nous avons utilisé les modèles SIMBA-POP et SIMBA-NEM afin de simuler la phénologie de nouvelles variétés de bananiers et la dynamique des nématodes qui leurs sont associées.

L'objectif de cette étude était d'utiliser les premières données recueillies sur ces variétés afin de prédire leur comportement vis-à-vis des nématodes phytoparasites sur le long terme. Les équilibres



du peuplement nématologique jouent un rôle important sur la durabilité des bananeraies ; si des espèces produisant peu de dommages sont favorisées au détriment d'espèces plus dommageables, le peuplement végétal cultivé pourra rester productif plus longtemps.

Pour la variété FB920, nos simulations montrent que sur le long terme (3 ans et plus) *Helicotylenchus multicinctus* dépasse les populations de *Radopholus similis* (P8). La **figure 8** présente les simulations des populations de *H. multicinctus* et *R. similis* pour trois niveaux différents d'inoculum initiaux. Ces résultats mettent en évidence que *H. multicinctus* surpasse sur le long terme *R. similis* quelque soit la situation initiale. La coexistence des deux espèces est cohérente avec les observations réalisées sur les parcelles cultivées avec cette variété. Cette étude illustre les besoins de connaissances sur la dynamique des bioagresseurs sur une diversité de plante cultivée. Les outils de modélisation représentent une voie privilégiée pour analyser les premières données acquises sur de nouvelles variétés et prévoir les tendances des dynamiques de populations associées. Cela devrait à terme aider les sélectionneurs à choisir plus précocement des variétés qui limitent le développement des espèces des nématodes phytoparasites les plus dommageables.



**Figure 8.** Simulation de la dynamique des populations de *Radopholus similis* et *Helicotylenchus multicinctus* dans une parcelle de bananiers de variété FB920 avec différents inoculum initiaux en nématodes : important en *R. similis* et faible en *H. multicinctus* (A), modéré en *R. similis* et en *H. multicinctus* (B), faible en *R. similis* et important en *H. multicinctus* (A) ; d'après P8.

### 2.2.2. Epidémiologie spatiale de *Cosmopolites sordidus*

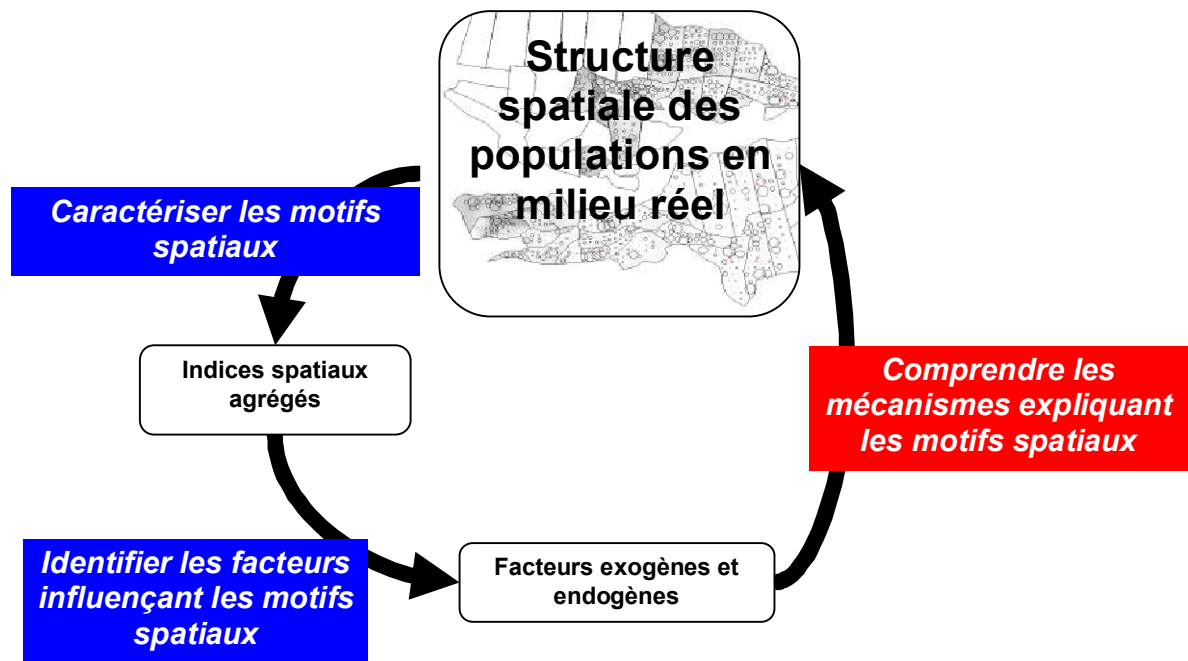
Publications P12, P13, P19, P20, S3 (P : publié ; S : soumis)

Le charançon du bananier est un des principaux facteurs limitants pour arriver à concevoir des systèmes de culture sans pesticide. Les aspects spatiaux de l'épidémiologie de cet insecte sont centraux pour son contrôle et pour maximiser l'efficacité des différentes techniques de lutte (**P13**). Par ailleurs, du fait de sa dispersion active (bien que relativement limitée), il est peu probable d'arriver à une exclusion de cet organisme de l'agroécosystème comme cela est possible avec le nématode phytoparasite *R. similis*. Au contraire, des assemblages innovants de systèmes de culture bananiers devront rétablir les équilibres écologiques afin de maintenir des populations de charançons supportables et de retarder la contamination des parcelles encore indemnes. Ce sujet est au cœur de la thèse de Fabrice Vinatier, dont j'ai assuré le montage du projet et la co-direction. Cette thèse est réalisée en collaboration avec l'équipe Plantes et Systèmes de cultures Horticole de l'Inra d'Avignon.

Le pathosystème bananiers-charançons (*Cosmopolites sordidus*) représente un cas d'étude privilégié pour appréhender les aspects de dynamique des populations des bioagresseurs et ceux d'épidémiologie spatiale. La mobilité modérée de cet organisme et ses interactions avec les différents habitats des systèmes de culture en font un modèle biologique adapté pour étudier les phénomènes de dispersion et les comportements de sélection de l'habitat (aussi bien à des échelles intra-parcellaires qu'à celles du groupe de parcelles). Le travail de thèse de Fabrice Vinatier repose sur l'utilisation de données existantes (données géolocalisées de piégeage sur des exploitations), sur la mesure de paramètres de dispersion avec des méthodes de marquage, et sur le développement d'un modèle de simulation afin de représenter la dynamique des populations et l'épidémiologie spatiale de l'insecte. Ce travail de thèse s'est structuré en quatre étapes :

- l'utilisation de données existantes et l'analyse de bases de données pour acquérir certains paramètres démographiques et de dispersion du charançon,
- la réalisation de mesures par marquage et 'radio-tracking' pour compléter ces paramètres,
- l'intégration de ces connaissances dans un modèle mécaniste de dynamique des populations et de dispersion en milieu hétérogène,
- l'utilisation de l'outil de simulation pour aider à la définition de *scenarii* d'organisation spatiale des systèmes de culture limitant les populations et la dispersion de ce ravageur.

Bien que centrée sur des approches de modélisation spatiale, une des originalités de ce travail de thèse repose sur la démarche générale d'utilisation conjointe des statistiques spatiales et des modèles de simulation afin de décrire, comprendre et simuler l'écologie spatiale du charançon du bananier (**figure 9**, P20). Cette approche semble particulièrement adaptée au cas d'étude où des mesures d'abondance existent, permettant de caractériser les motifs spatiaux de distribution, et où des hypothèses sur les mécanismes expliquant cette distribution doivent être testées.

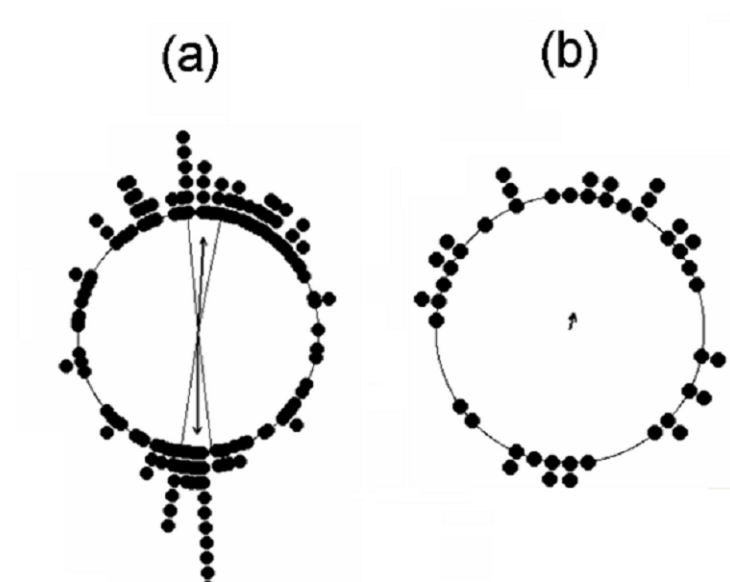


**Figure 9.** Proposition de démarche en écologie spatiale pour étudier la distribution spatiale des espèces en utilisant de manière itérative les statistiques spatiales (bleu) et les modèles de simulation (rouge), d'après P20.

L'acquisition de connaissances sur les traits de vie associés à la dispersion ont été possibles grâce au développement et à l'utilisation d'une méthode de marquage avec des micro capteurs RFID (Radio Frequency Identification, **figure 10**). Cette méthode de suivi par radio télémétrie permet de suivre individuellement chaque insecte, sur un pas de temps journalier et sans provoquer de perturbations associées à la recapture. Cette méthode avec une distance de détection d'environ 30 cm est particulièrement adaptée au suivi d'organismes cryptiques ayant une capacité de dispersion modérée. Les mesures réalisées nous ont permis de caractériser le déplacement des charançons (P19). Ainsi, nous avons mesuré dans différents milieux (jachère, parcelles jeunes et âgées) les paramètres de dispersion, avec notamment la distribution des distances de dispersion et le taux de mobilité, en interaction avec les différents habitats des systèmes de culture (bananiers, résidus de culture, sol nu, plante, de couverture).



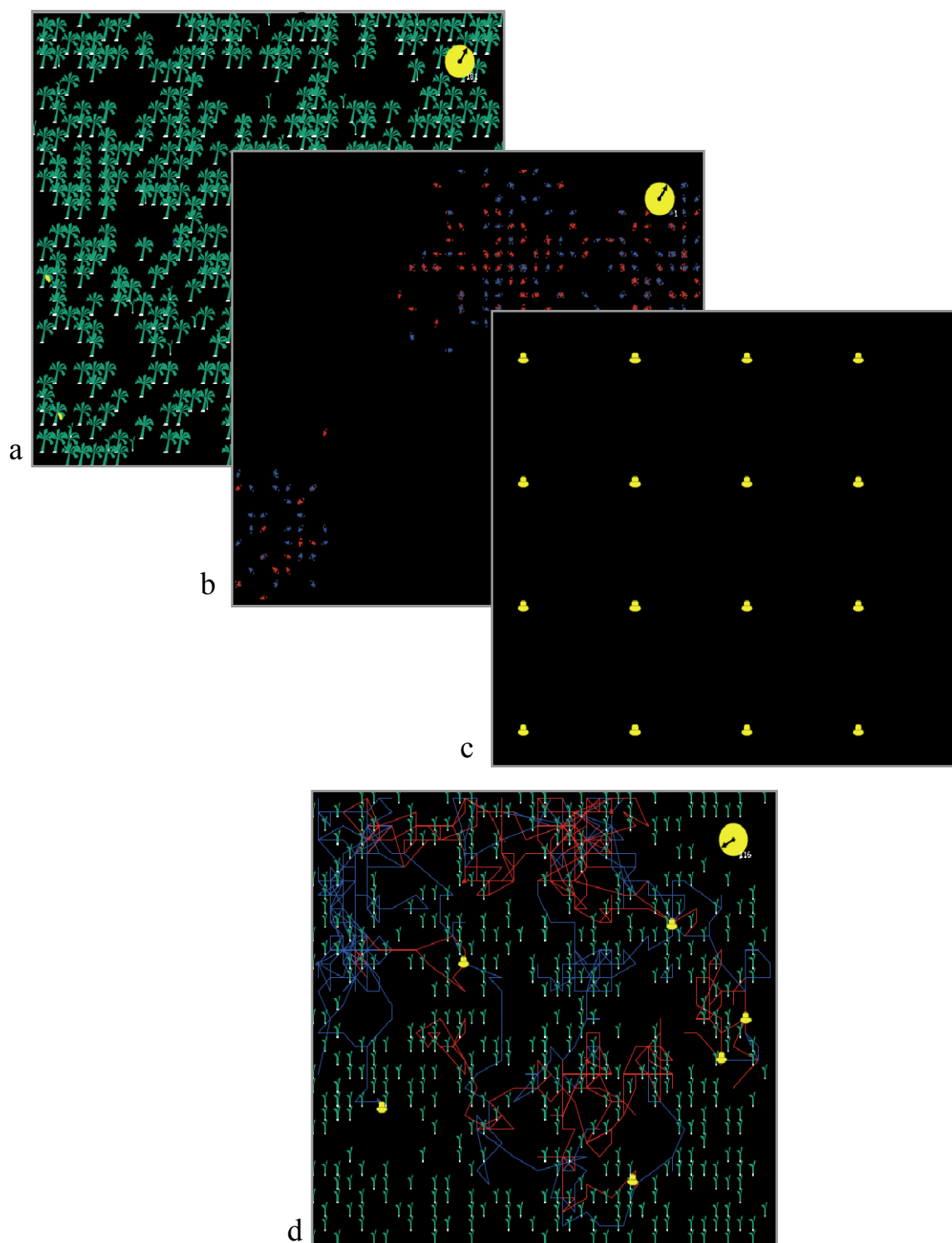
**Figure 10.** Photographie de charançon marqué avec une puce RFID (photo Fabrice Vinatier).



**Figure 11.** Analyse des angles absolus des déplacements des charançons sur sol nu (a) et dans les résidus de culture (b), montrant une direction préférentielle vers les résidus de culture (a), alors qu'il n'y a pas de direction préférentielle dans les résidus de culture (b), d'après P19.

Afin de mettre en évidence le rôle de l'organisation sur la dispersion, des statistiques spatiales ont été utilisées, comme par exemple des statistiques circulaires permettant d'analyser le rôle des habitats sur les directions préférentielles des déplacements. La **figure 11** illustre ces analyses, montrant la fréquence des angles absolus de déplacement des charançons dans des parcelles de bananiers sur sol nu et dans les résidus de culture. Cette figure montre qu'il y a un déplacement préférentiel vers les résidus de culture. L'ensemble des mesures de trajectoires réalisées par radio télémétrie RFID ont permis de calibrer les paramètres de dispersion en interaction avec les différents habitats, permettant *in fine* de paramétrer un algorithme de déplacement et de sélection de l'habitat. Cet algorithme comprend des lois multinomiales basées sur le choix d'un habitat de destination en fonction de sa distance à l'habitat de départ et de son attractivité (**S3**). Cette caractérisation et cette représentation du déplacement du charançon sont à la base de la construction du modèle de simulation de l'épidémiologie spatiale du charançon en milieu hétérogène (modèle COSMOS, **P12**). Il s'agit d'un modèle spatialement explicite et individu centré, simulant au pas de temps journalier la dynamique des populations de charançons et sa répartition spatiale. L'algorithme utilisé dans ce modèle pour simuler la dispersion et la sélection de l'habitat se fait par approche probabiliste intégrant la distance et la qualité de l'habitat de départ et d'arrivée, se différenciant de l'approche 'best cell' qui choisit uniquement la meilleure cellule d'arrivée. C'est le couplage d'une méthode de mesure journalière des trajectoires individuelles et non perturbante qui a rendu possible ce formalisme se rapprochant des aspects comportementaux de dispersion. Le modèle COSMOS permet de comprendre comment les populations des charançons interagissent avec la dynamique de la ressource de la plante hôte, des pratiques culturales, et des moyens de phyto-protection, tel que l'utilisation de pièges à phéromones attirant les insectes adultes (mâles et femelles). Il permet de rechercher des assemblages spatio-temporels de systèmes de culture limitant le développement de ce bioagresseurs (**figure 12**).

Ce travail est au cœur de l'activité de l'axe de recherche 'Dynamique des bioagresseurs et des communautés en conditions d'intensification écologique' de l'UPR26 dont j'assure l'animation scientifique. Il permet de traiter de questions plus générales concernant l'effet d'un environnement hétérogène sur la dispersion et la dynamique des populations d'un bioagresseur. Ce questionnement semble émerger à différentes échelles dans un grand nombre d'agroécosystèmes. A titre d'exemple, dans l'ATP (Action Thématique Programmée) Oméga3 (Optimisation des Mécanismes Ecologiques de Gestion des bio-Agresseurs pour une Amélioration durable de la productivité des Agrosystèmes), une étude montre l'importance de disposer d'un cadre formalisé pour traiter des interactions entre biodiversité du champ cultivé (incluant son organisation spatiale et temporelle) sur les dynamiques de bioagresseurs. Ce cadre sera discuté dans la partie projet de ce document.



**Figure 12.** Représentation des différents éléments du paysage pris en compte dans le modèle COSMOS : (a) population de bananiers, (b) population initiale de charançons, mâles en bleu et femelles en rouge, (c) pièges à phéromone, et (d) simulation de la dynamique des populations et du déplacement des charançons dans ce milieu hétérogène, les lignes bleues et rouges représentent les trajectoire des charançons à chaque pas de temps respectivement pour les mâles et les femelles.

### 3. Evaluer et concevoir des systèmes de culture plus durables

L'amélioration des systèmes de culture doit prendre en compte la grande diversité des conditions naturelles (sol, climat), de pratiques et de contextes d'exploitations, ainsi que la grande instabilité de leur contexte (marché, réglementation, innovation génétique,...). Il n'existe donc pas de solution immuable et universelle mais un grand nombre de solutions possibles devant être adaptatives (Meynard et al., 2001). Les solutions proposées doivent intégrer les acteurs concernés par ces problèmes et assurer la coordination entre des actions dont les effets s'expriment sur des espaces différents. La capacité d'évaluation des systèmes existants ou innovants est donc un des éléments clés de la conception de prototypes de systèmes de culture (prototypage). Différentes méthodes d'évaluation existent, elles doivent permettre de porter un jugement sur le système. Les phénomènes complexes ayant lieu au sein d'un agroécosystème peuvent être rendus plus lisibles par l'intermédiaire d'indicateurs (Bockstaller et al., 1997). L'évaluation principalement agronomique et environnementale des systèmes de culture a suscité le développement de nombreuses technologies aussi variées que l'évaluation énergétique des systèmes ou celle des performances agronomiques.

D'une manière générale, l'innovation peut prendre la forme de nouvelles techniques ou la forme de nouveaux agencements des techniques existantes. Ces deux types d'innovations ne nécessitent pas les mêmes recherches. Le premier nécessite une réflexion amont et le test des pratiques. Il peut s'agir aussi bien de l'utilisation de nouveaux intrants, que de nouvelles associations culturales ou bien de l'utilisation de nouveaux outils. Le second type d'innovation correspond plus à une optimisation des techniques dont dispose l'agriculteur, aussi bien au niveau stratégique que tactique. Pour tester des nouvelles combinaisons de pratiques, l'expérimentation factorielle est une méthode classique. Elle permet de tester de manière optimale, dans un milieu donné, la combinaison d'un petit nombre de pratiques ; elle trouve des limites dans le nombre de combinaison qu'il est possible de tester ainsi que dans le temps nécessaire pour les réaliser. A cause de ces limites, l'utilisation de modèles de simulation (d'un ou plusieurs phénomènes impliqués dans le système que l'on tente d'améliorer) s'est généralisée. Ces modèles permettent de fournir des réponses rapides à l'adaptation des techniques culturales à un nouveau milieu ou à une évolution du contexte, ils permettent de tester un grand nombre de *scénarii* techniques, d'explorer la sensibilité des résultats au climat ou à une évolution du contexte. Dans le processus de « prototypage » proposé par Vereijken (1997) il y a cinq étapes comprenant :

- la hiérarchisation des objectifs à atteindre,
- la transformation des objectifs en paramètres,

- la conception d'un prototype théorique,
- le test du prototype dans des fermes expérimentales,
- la dissémination du prototype par le biais d'un groupe de fermes pilotes.

Mes travaux de recherche dans le domaine de la conception des systèmes de culture m'ont amené à développer i) des outils permettant d'assister l'évaluation des systèmes de culture, et ii) des méthodes originales basées sur l'utilisation des modèles de simulation permettant de définir des prototypes de systèmes de culture innovants. Ces outils et ces méthodes trouvent une place privilégiée dans les projets de recherche et de développement actuellement menés aux Antilles Françaises. C'est le cas du Plan Banane Durable qui vise d'ici 2013 à définir et transférer des prototypes innovants aux producteurs de banane dessert de cette zone.

### **3.1. Outils et méthodes d'évaluations des risques associés aux pesticides**

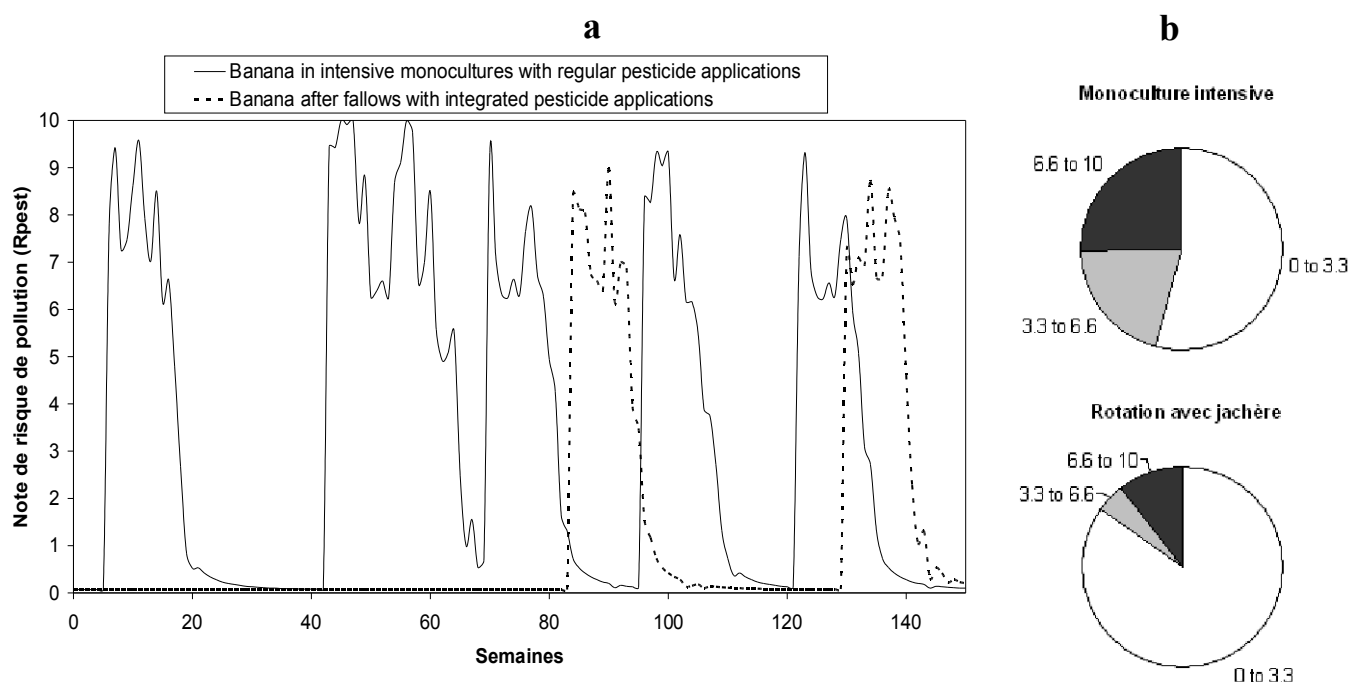
Publications P3, P5, P9 (P : publié ; S : soumis)

L'évaluation des risques associés à l'usage des produits phytosanitaires représente avec les performances agronomiques un critère d'évaluation clé pour les systèmes de culture bananiers. Les modèles de simulation du transfert des pesticides dans l'environnement sont rarement disponibles pour une large gamme de situations de sols, de climats, et de pratiques. De plus, la plupart des indicateurs agri-environnementaux existants ont été conçus pour une évaluation annuelle de systèmes de culture, le plus souvent sur la base d'un seul cycle de culture. A ce pas de temps, il est souvent impossible de détecter l'existence de risques à court terme ou d'effectuer un monitoring des variations du risque au cours du temps. En conséquence, ces indicateurs ne sont pas adaptés à l'évaluation de systèmes pérennes ou semi-pérennes comme les systèmes bananiers, dont la structure (et les risques associés) évoluent au cours du temps sans suivre une saisonnalité imposée par un climat tempéré. Des indicateurs nouveaux doivent donc être conçus et testés pour évaluer les risques à court terme mais sur un pas de temps long, tout en prenant en compte les caractéristiques spécifiques de systèmes pérennes hétérogènes en terme de stade de développement. Ces indicateurs requièrent la connaissance de l'évolution au cours du temps de variables d'état du système comme la couverture, le niveau de compaction ou l'état hydrique du sol, la surface foliaire, la structure du peuplement cultivé, etc.

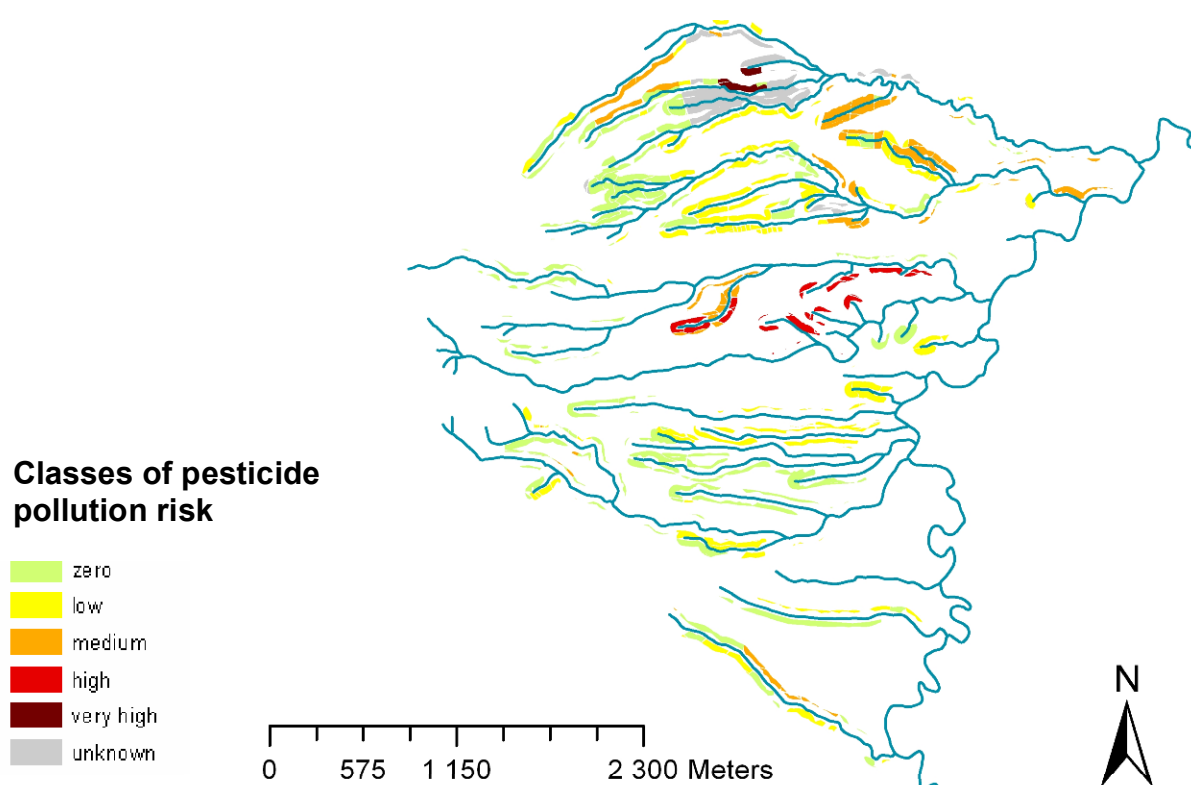
En collaboration avec l'équipe de l'INRA Colmar, j'ai développé un indicateur d'évaluation du risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires. Cet indicateur appelé Rpest (**P3**)



reprend la structure de la série des indicateurs de la méthode Indigo (Bockstaller et al., 2008), avec une agrégation basée sur un système expert utilisant la logique floue. Cet indicateur est caractérisé par le lien avec différents modules de la plateforme SIMBA qui permet de simuler à un pas de temps hebdomadaire les variables relatives à l'état du milieu, aux pratiques culturales et aux caractéristiques des substances actives concernées. Ce lien indicateur-modèle permet de calculer une note de risque au pas de temps hebdomadaire. La note calculée permet dans un premier temps de détecter les périodes de risques générées par les systèmes simulés (**figure 13a**) et dans un second temps, de comparer les systèmes entre eux, après avoir intégré les notes de risque sur l'ensemble de la période de culture (**figure 13b**).



**Figure 13.** Evaluation dynamique (a) et intégrée (b) du risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires de deux systèmes de culture avec l'indicateur Rpest, d'après P3.



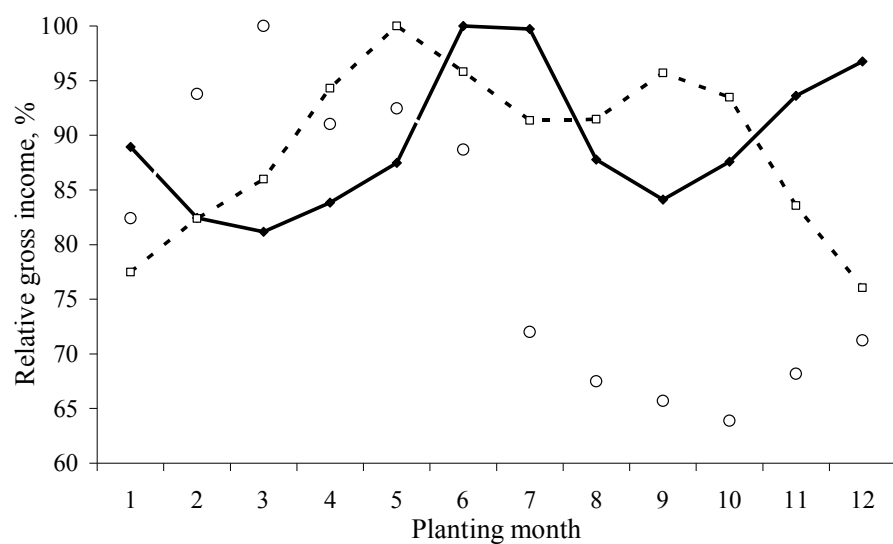
**Figure 14.** Calcul de l'indicateur IcPhyto dans une zone de 50 m autour des cours d'eau sur le bassin versant de la rivière Capot en Martinique (d'après P9).

Dans le cadre de la thèse de Marie Houdart, j'ai également participé à la formalisation de l'indicateur IcPhyto (**P9**) qui reprend les mêmes principes que l'indicateur Rpest pour évaluer l'exposition du milieu et la toxicité de substances actives. Il a été utilisé afin d'évaluer le risque de pollution par les pesticides, de manière spatialisée à l'échelle d'un bassin versant. Nous avons appliqué cet indicateur au bassin versant de la rivière Capot en Martinique afin d'identifier les zones à risques et les pratiques culturales à risques (**figure 14**). Cet indicateur a permis d'orienter la politique agricole de la zone où il a été appliqué.

Enfin, en utilisant des modèles de simulation j'ai pu définir une méthode d'évaluation du risque de retrouver des résidus de pesticides dans les bananes (**P5**). La méthode développée était basée sur la prise en compte d'un niveau de résidus de pesticides fonction de l'intervalle application – récolte, au sein d'un peuplement de plantes désynchronisé (stades hétérogènes). Le couplage entre les processus écophysiologiques et le transfert des pesticides dans la plante représente probablement une perspective nécessaire à l'évaluation précise du risque de contamination des produits agricoles par des résidus de pesticides.

### **3.2. Utiliser des modèles et des indicateurs pour assister la conception de systèmes de culture**

Les modèles permettent d'aider à la conception et au choix des prototypes à tester. Ils sont donc utilisés dans ce cadre comme des outils d'exploration et non comme des outils prédictifs (Rossing et al., 1997). Dogliotti et al. (2004) ont proposés une méthode pour développer des prototypes pour des systèmes maraîchers en Uruguay (ils basent leur approche au niveau stratégique, principalement sur l'optimisation des rotations et des périodes d'inter culture). Cette méthode utilise de manière préliminaire un outil (ROTAT) permettant de générer et de sélectionner les rotations potentiellement durables et viables (Dogliotti et al., 2003). D'autres méthodes développées abordent de manière plus spécifique le niveau tactique, comme le modèle BETHA (Loyce et al., 2002) : il permet de générer, évaluer et trier les systèmes de cultures à base de blé éthanol. Certaines méthodes de prototypage et de pilotage des systèmes de culture recherchent à chaque pas de temps (celui du modèle de simulation utilisé) les meilleures pratiques à réaliser. Ce type de méthodes permet une adaptation des pratiques à l'environnement et répondent aussi bien aux exigences du prototypage que du pilotage. Mes travaux dans ce domaine ont concerné l'utilisation des modèles de simulation aussi bien à l'échelle tactique (pour aider à la mise au point et à l'optimisation de pratiques culturales) qu'à l'échelle stratégique (avec la définition d'assemblages de pratiques au sein de systèmes de culture intégrés).



**Figure 15.** Variation du chiffre d'affaire cumulé pendant 4 ans (exprimée en pourcentage par rapport au meilleur mois) pour chaque mois de plantation et pour des altitudes de 50 (—●—), 350 (---□---) et 650 mètres (—▲—) (d'après P4).

### 3.2.1. Optimiser des pratiques culturelles

Publications P2, P4, P7, P15, P16 (P : publié ; S : soumis)

Les modèles de simulation sont particulièrement adaptés à l'optimisation de processus dans des contextes variés. Appliqués au fonctionnement de l'agroécosystème, ils permettent d'optimiser des pratiques culturelles dans des contextes de sol et de climat sans avoir systématiquement recours à des expérimentations dans chaque contexte.

#### 3.2.1.1. Optimiser la conduite du peuplement cultivé

Avec l'avènement des vitroplants de bananiers, la date de plantation d'une bananeraie est devenue beaucoup plus souple. Elle peut s'effectuer pratiquement toute l'année grâce à la possibilité de planter sur sol peu ou pas travaillé. Selon les conditions climatiques, le développement des bananiers est plus ou moins rapide et les pics de récoltes sont plus ou moins espacés dans le temps. La répartition de ces pics de récoltes dans le temps, leur étalement (qui devient de plus en plus important, **figure 2**) et la variation saisonnière du prix de vente de la banane (qui est relativement récurrent d'une année sur l'autre) engendrent des variations potentielles significatives du chiffre d'affaires, en fonction des dates et des altitudes de plantation.

Le couplage du module de dynamique des populations des stades de bananiers SIMBA-POP et d'un module d'évaluation économique de la marge brute a permis d'évaluer le revenu potentiel de chaque date de plantation pour différentes altitudes, et ainsi de déterminer la ou les périodes de plantation susceptibles de générer le meilleur revenu (**P4**). La **figure 15** présente la variation du revenu potentiel (exprimée en pourcentage par rapport au meilleur mois), pour chaque mois de plantation et pendant 4 ans pour une altitude de 50 mètres. Cette figure montre qu'il peut y avoir une variation de plus de 10% de revenus entre le meilleur et le moins bon mois de plantation. Des optimisations ont été réalisées pour différentes zones climatiques. Ce modèle est un exemple réussi d'utilisation d'un modèle initialement théorique (simulation d'un peuplement de plantes, basé sur des concepts d'écologie et d'écophysiologie) dans un contexte d'aide à l'optimisation de pratiques culturelles. Mes travaux m'ont également amené à travailler à l'optimisation de la date de récolte pour maximiser la conservation des fruits (P15, P16).

### **3.2.1.2. Optimiser les apports d'intrants pour maximiser leur efficacité**

#### **Optimiser les applications d'engrais azoté**

La conception de systèmes de culture moins polluants implique de raisonner les apports de fertilisants et notamment d'azote. Dans les systèmes de culture bananiers destinés à l'export, les apports d'azote sont largement excédentaires, avec entre 350 et 500 kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Les besoins des bananiers sont d'environ 200 kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> et seulement 100 kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> sont exportés par le régime. Ces apports excédentaires s'expliquent par une recherche de rendements élevés, par d'importantes pertes par lessivage (liées aux fortes précipitations) et par une sous estimation de l'azote fourni par la minéralisation des résidus de culture (150 kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) et de la matière organique du sol (compris entre 3 et 25 kg ha<sup>-1</sup> semaine<sup>-1</sup> selon le type de sol). Nous avons utilisé le modèle SIMBA-N pour rechercher la quantité optimum des apports permettant de satisfaire la plante et de limiter les pertes par lessivage. Nous avons évalué les pertes par lessivage et mesuré la satisfaction de la plante avec l'indice NSI (Nitrogen Satisfaction Index) pour cinq scénarios (T0 à T4), correspondant respectivement à 20, 120, 220, 320, et 420 kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (**P7**). Cette application de l'outil de simulation met en évidence que seuls les traitements T0 et T1 engendrent des périodes durables de stress pour la plante. Nos simulations font apparaître une marge pour diminuer les doses d'engrais azotés. Récemment, nous avons développé une approche pour optimiser les pratiques de fertilisation azotée dans le cas de l'association bananier-plante de couverture. La présence de la plante de couverture modifie le fonctionnement du cycle de l'azote dans le système sol-plante des bananeraies avec des prélèvements d'azote par la plante, mais aussi des restitutions de résidus de biomasse morte. Dans ce cas, les pratiques que nous avons optimisées sont relatives à la dose d'azote apportée et aux pratiques de gestion de la plante de couverture, notamment la fréquence de tonte. De manière générale, les nouvelles pratiques de gestion de la fertilisation visent à refermer les cycles biogéochimiques en introduisant de nouveaux compartiments (plante de couverture, matière organique du sol, biomasse morte en surface...), et en modifiant les flux entre ces compartiments. Cette complexification des cycles biogéochimiques permet de limiter les sorties des stocks minéraux par lessivage ; dans les systèmes intensifs simplifiés le cycle de l'azote est ouvert, les plantes de couverture participent à sa fermeture.

#### **Optimiser la date d'application des nématicides**

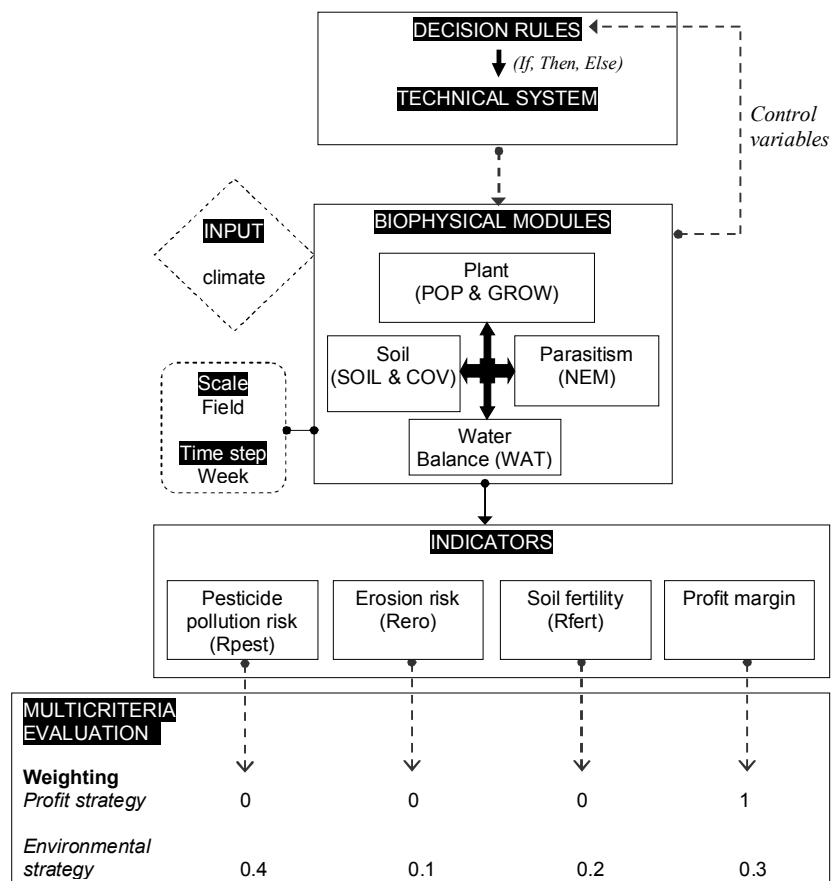
Les nématicides représentent une part importante des molécules pesticides utilisées dans les bananeraies. En plus de réduire fortement leur usage, il est important d'optimiser leur efficacité, lorsqu'ils sont devenus indispensables. Nous avons utilisé le module de simulation SIMBA-NEM

pour rechercher la date d'application des nématicides ayant un effet maximal sur les populations de nématodes. Dans ce cas, l'efficacité d'une application de nématicide va dépendre de la taille de la population des nématodes phytoparasites et de la période de la croissance de cette population, fortement contrainte par la dynamique de la ressource racinaire disponible. Nos simulations montrent que la période optimum pour appliquer un nématicide se situe autour de la floraison des bananiers (**P2**). Cette optimisation doit aussi intégrer la prise en compte des contraintes réglementaires à l'application de pesticides durant la période précédant la récolte (délai d'application avant récolte). Le délai réglementaire vise à limiter les risques de résidus de ces molécules dans les produits exportés. Dans le cas des bananeraies, où la population de plantes peut être désynchronisée (en terme de stades phénologiques), cela peut entraîner l'impossibilité de réaliser un traitement sur l'ensemble de la parcelle. Nous avons développé une approche de prévision du risque d'avoir des résidus de pesticides (nématicide) dans les fruits, selon l'hétérogénéité du peuplement de bananiers (**P5**). Cet exemple d'application d'un modèle de dynamique des populations de bioagresseurs pour optimiser une pratique culturale montre l'importance de l'étude de la relation entre la dynamique des bioagresseurs et la croissance et le développement de la plante cultivée. Il y a dans ce cadre, des perspectives prometteuses visant à influencer sur la vitesse de développement des plantes cultivées pour minimiser le développement des populations de bioagresseurs.

### **3.2.2. Prototyper des systèmes de culture innovants**

#### Publications P6, P11, P17 (P : publié ; S : soumis)

Utiliser des modèles de simulation pour aider à concevoir des systèmes de culture dans leur globalité nécessite de disposer d'outils de simulation englobant l'ensemble des processus impliqués dans le fonctionnement biophysique des systèmes simulés, et de disposer de sorties permettant d'évaluer la durabilité de ces systèmes. Dans le cas des systèmes à base de bananiers, l'ensemble des modules de simulation présentés précédemment a été intégré au sein d'un modèle de simulation unique : SIMBA. Ce modèle permet de simuler les critères agronomiques, économiques et environnementaux des systèmes de culture qui sont décrits par un ensemble de règles de décisions. Le modèle a été utilisé à l'échelle de la parcelle (là où une méthode de prototypage en deux étapes a été utilisée), et à l'échelle de l'exploitation (pour tester les performances de systèmes de culture innovant) en prenant en compte les contraintes de chaque type d'exploitation.



**Figure 16.** Structure générale du modèle SIMBA et des indicateurs d'évaluation multicritère, d'après P6.



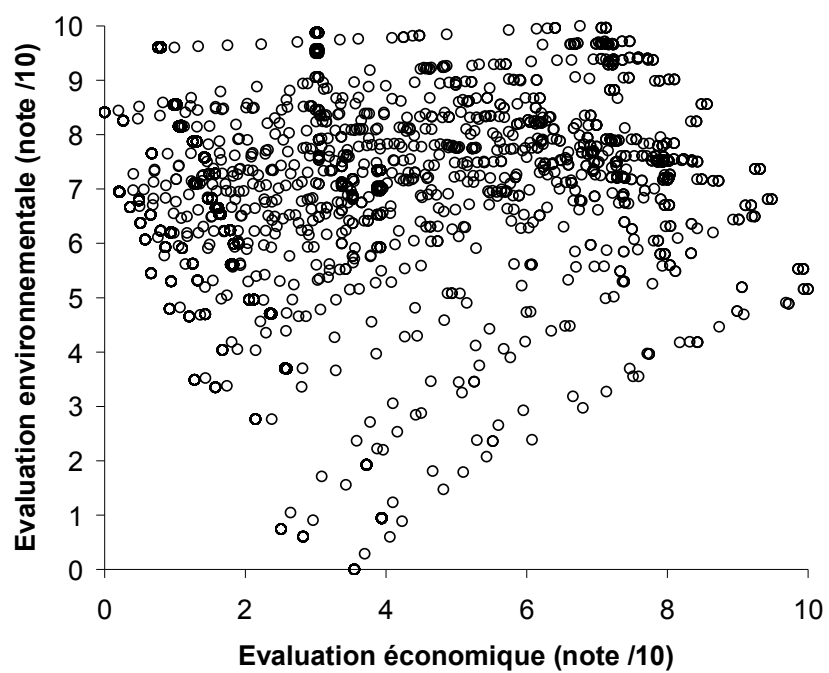
### 3.2.2.1. Une approche intégrée à l'échelle de la parcelle

Depuis 25 ans, des modèles de culture ont été développés, principalement à l'échelle de la parcelle. Ils visent à estimer des grandeurs agronomiques ou physiologiques, parfois les impacts environnementaux et les performances économiques de ces systèmes. Ces modèles considèrent le système sol-plante dans son environnement physique et technique. Le milieu est souvent considéré comme homogène sur la zone simulée. Les principales variables d'entrée sont climatiques, pédologique (comme la texture et la profondeur), et culturelles. Les sorties agronomiques sont généralement le rendement, la biomasse, l'indice foliaire ('Leaf Area Index' LAI) et des indices de stress. Certains modèles ont des sorties environnementales concernant le plus souvent l'exportation de composés chimiques : lixiviation du nitrate, exportation de produits phytosanitaires ou consommation en eau. Peu de modèles embrassent la totalité des composantes de la durabilité (fertilité des sol, rendement, performance économique, risques environnementaux, développement des bioagresseurs...). Dans le cas des systèmes bananiers, nous avons développé le modèle SIMBA qui intègre le fonctionnement agronomique et écologique global et l'évaluation des principaux risques environnementaux (**figure 16**). Cela a été possible car il intégrait une base de connaissances importantes, acquises dans toutes ces disciplines. Le travail d'intégration des connaissances représente une grande partie de mon activité de modélisateur dans une équipe pluridisciplinaire, allant de l'agronomie à l'évaluation des transferts de pesticides dans le milieu.

Ce modèle global du fonctionnement des agroécosystèmes bananiers a été utilisé afin de réaliser une évaluation multicritère *in silico* de systèmes de culture innovants, et de participer à la conception de systèmes de culture plus durables (**P6**). J'ai développé une utilisation de ce modèle dans le cadre d'une démarche de prototypage de système de culture comprenant deux étapes :

1. la simulation d'un grand nombre de combinaisons de pratiques culturales et leur évaluation multicritère,
2. la détermination de tendances de systèmes de culture à partir des systèmes les plus prometteurs issus de l'étape 1.

L'utilisation de règles de décision afin de représenter les pratiques culturales des agriculteurs permet de simplifier les procédures de test de *scenarii* de systèmes de culture. Ces règles de décision sont formalisées par des boucles conditionnelles (Si, Alors, Sinon). En faisant varier les seuils utilisés dans les boucles conditionnelles, il est possible d'explorer de manière exhaustive une large gamme de pratiques culturales.



**Figure 17.** Evaluation économique et environnementale, réalisée avec le modèle SIMBA, de 4050 combinaisons de pratiques culturales, d'après P6.

La **figure 17** illustre la première étape de cette méthode de prototypage avec le test d'un grand nombre de combinaisons de règles de décisions et leur évaluation sur des critères agronomiques et environnementaux. Ici les règles de décisions concernent des choix stratégiques (nombre de cycles de culture, culture précédente) et des choix tactiques (fertilisation, gestion des bioagresseurs, travail du sol...).

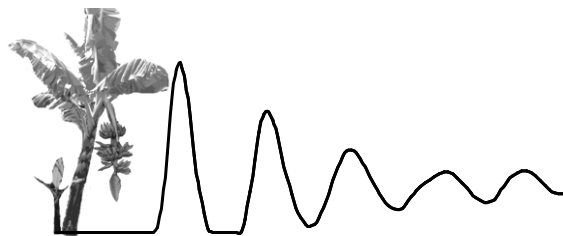
### **3.2.2.2. Prise en compte des contraintes à l'échelle de l'exploitation**

Dans le cadre de la thèse de Jean-Marc Blazy, nous avons adapté et utilisé le modèle SIMBA afin de simuler des innovations 'low input' (principalement basées sur de nouvelles rotations et l'utilisation de plantes de couverture). L'originalité de cette démarche résidait dans le fait que notre évaluation était contextualisée dans différents types d'exploitations agricoles (**P11**). Cela a permis de montrer que les innovations ne sont pas adaptées à tous les types d'exploitations. Ce travail s'insère dans le cadre de deux projets (ANR ADD Geduque auquel je participe, et MEDDM systèmes de culture bananiers sans pesticides, que je coordonne). Ce travail vise à associer les approches de modélisation biophysique des agroécosystèmes avec les sciences économiques et sociales. Peu de modèle considère la dynamique d'adoption des innovations sur les performances à l'échelle de l'exploitation. Le modèle BANAD, développé dans le cadre de la thèse de Jean-Marc Blazy, comprend i) une base de donnée sur la typologie des exploitations, ii) le modèle SIMBA, iii) un modèle de système technique, et iv) un modèle d'intégration à l'échelle de l'exploitation (**P17**). Ce modèle a été utilisé pour évaluer, de manière *ex ante*, six systèmes de culture innovants dans trois contextes d'exploitation contrastés. Les résultats montrent que l'impact des innovations (rotations, jachères améliorées, associations culturales, nouvelles variétés, systèmes biologiques) est extrêmement dépendant du contexte de l'exploitation. Des innovations performantes à l'échelle de la parcelle peuvent être adoptables à l'échelle de l'exploitation, par exemple une gestion de la main d'œuvre non compatible avec le fonctionnement de l'exploitation. L'adoption des rotations et des jachères améliorées sont les plus appropriées pour les petites exploitations mais une période de 1.5 à 2.5 années de transition peut être difficile à franchir (la baisse de revenus durant cette période peut-être inacceptable). Cette étude facilite le développement des politiques d'aide à la promotion des pratiques les plus performantes au niveau environnemental.

Ces outils et ces méthodes, développés pour les systèmes bananiers exports, ont permis de développer, d'adapter des concepts souvent utilisés dans d'autres contextes de production tels que des grandes cultures tempérées. Ces adaptations ont données lieu à l'intégration de composantes

souvent ignorées dans les modèles de culture : prise en compte des dynamique de populations de bioagresseurs ou couplage d'un modèle de simulation du système biophysique avec des outils d'évaluation environnementale. Ces travaux ouvrent un champ de perspectives particulièrement stimulant avec l'intégration d'innovations basées sur l'utilisation de la biodiversité dans des systèmes plurispécifiques. Ces systèmes innovant sont particulièrement adaptés aux paysans des pays du sud. Ces innovations se basant sur les services écosystémiques vont nécessiter d'embrasser plus largement le fonctionnement écologique des agroécosystèmes. Les concepts nécessaires pour traiter de cette complexité sont développés dans la partie projet de ce document.

### **III. PROJET DE RECHERCHE**





### **III. Projet de recherche**

#### **1. Préambule**

Les perspectives de recherche que je présente se situent à l'interface entre écologie et agronomie. La question générale dans laquelle elles s'inscrivent est celle du rôle de la diversité biologique dans la productivité et la stabilité des agroécosystèmes; la régulation des bioagresseurs est un élément clé de cette stabilité, et elle est au centre de mon projet. Je choisis comme cadre conceptuel le lien entre les modèles agronomiques et les modèles de réseaux trophiques. Mes perspectives concernent plusieurs niveaux d'organisation et d'échelles : prioritairement le champ cultivé, mais aussi des échelles plus englobantes (le voisinage de ce champ jusqu'au paysage). Ces perspectives d'intégration, à la fois de regards disciplinaires (écologie et agronomie) et de niveaux, nécessitent le développement d'approches cognitives intégratives et d'outils de modélisation adaptés. Les cadres conceptuels et méthodologiques de l'écologie des communautés puis (dans une moindre mesure), de l'écologie du paysage, sont mobilisés pour aborder l'analyse du fonctionnement d'agroécosystèmes tropicaux et leur durabilité. Au-delà de l'enjeu de développement, ces systèmes présentent une très grande gamme de complexité (des monocultures jusqu'aux systèmes agroforestiers) en terme de biodiversité, de diversité végétale cultivée et d'organisation spatiale - ce qui permet de tester relativement facilement des hypothèses concernant le rôle de la diversité sur le fonctionnement des écosystèmes.

Il s'agit aujourd'hui d'élaborer des connaissances dans les domaines de la biologie et de l'écologie pour gérer l'espace agricole de façon intégrée et pour assurer la durabilité de ses multiples fonctions (production, préservation des ressources, conservation de la biodiversité, etc.). Inversant la tendance à l'artificialisation croissante des milieux qui résulte de la maximisation d'une seule variable de production, la démarche actuelle de conception de systèmes de culture innovants est orientée par la nécessité d'assurer conjointement production et services écologiques. Pour ce faire, cette artificialisation doit être substituée par des processus écologiques. Ma formation initiale en écologie me permet d'aborder les questions théoriques et appliquées, concernant la conception de systèmes de culture valorisant les processus écologiques.

Les recherches actuelles en agroécologie montrent que de nouvelles méthodes et outils doivent être élaborés. Les outils de modélisation font parti des outils à utiliser pour mieux appréhender le fonctionnement de ces agroécosystèmes complexes et pour participer à la définition de systèmes qui optimisent les processus écologiques. Ce changement dans les outils de modélisation doit accompagner la valorisation des processus écologiques des systèmes cultivés. Dans ces systèmes

complexes, les interactions entre plantes cultivées, communautés de bioagresseurs, communautés d'auxiliaires, et communautés 'non-productives' deviennent centrales. Il y a donc un besoin d'approches intégratives : l'écologie isotopique en est un exemple. En partant de la posture « initiale » des agronomes, l'appréhension des phénomènes écologiques implique de passer de modèles centrés sur la plante à des modèles intégrant les autres communautés de l'agroécosystème (comme les modèles de réseaux trophiques, qui prennent en compte aussi bien les paradigmes de l'écologie des communautés que ceux de la dynamique des populations). Les modèles de réseaux trophiques permettent de simuler la stabilité du système (et les concepts associés de résistance et de résilience) et par conséquent permettent de prévoir comment le système simulé répond aux perturbations.

Je propose deux axes de recherche. Le premier concerne l'utilisation du concept de réseau trophique pour comprendre et modéliser le fonctionnement global des agroécosystèmes en général et les dynamiques et la régulation des bioagresseurs en particulier. Dans le second axe de recherche, je propose de prendre en compte la dimension spatiale des interactions trophiques au sein de l'agroécosystème. Le recours à des modèles spatialement explicites permettra de comprendre comment l'hétérogénéité spatiale des agroécosystèmes (principalement l'organisation des peuplements végétaux présents sur les parcelles) modifie la dispersion des différents groupes trophiques et *in fine* la régulation des bioagresseurs.

Le partenariat permettant de mener à bien ce projet comprendra les équipes spécialisées dans l'étude des systèmes de culture considérés (bananiers export et systèmes agroforestiers du CARBAP, du CATIE, ou de l'UMR System par exemple). Il s'agira également d'un partenariat avec des équipes spécialisées dans l'étude de processus écologiques tels que l'épidémiologie spatiale des bioagresseurs (avec par exemple Wageningen University Research 'department of plant science', de Rothamsted Research 'Department of Plant and Invertebrate Ecology' et de l'étude des interactions trophiques (avec par exemple l'INRA PSH d'Avignon ou l'UMR CBGP). Ce projet et ce partenariat prennent déjà corps ; c'est d'abord pour partie le projet de mon unité de recherche (axe 1 – Dynamique des bioagresseurs et des communautés en conditions d'intensification écologique) et ce sont des projets en cours tels que l'ATP du Cirad Oméga3 qui étudie le déploiement spatial et temporel de la diversité végétale pour des bioagresseurs. Dans ce projet une large gamme de bioagresseurs sont étudiés, caractérisés par leur spécificité pour leurs hôtes et par leurs capacités de dispersion ([www.open-si.com/omega3](http://www.open-si.com/omega3)).

Ce projet reposera sur l'encadrement de doctorants, avec à la fois des étudiants des pays du nord et du sud, permettant de répondre au mandat du CIRAD. Afin que ces futures thèses se déroulent dans les meilleures conditions, j'apporterai une attention particulière à la sélection des candidats ;



j'estime que cette phase est essentielle pour choisir des étudiants vraiment motivés pour les recherches proposées. Au-delà de l'initiation à la recherche que représente la thèse (en terme de démarche expérimentale), j'estime que les encadrants de doctorants se doivent également de les former à la communication scientifique et notamment l'exercice de publications scientifiques (à l'instar de la thèse de Fabrice Vinatier qui aura produit six articles au cours de son travail de doctorat). Enfin, je pense que les co-encadrants et le comité de pilotage jouent un rôle majeur dans le cas de sujets à la croisée de plusieurs disciplines, comme c'est le cas dans le domaine de l'agroécologie.

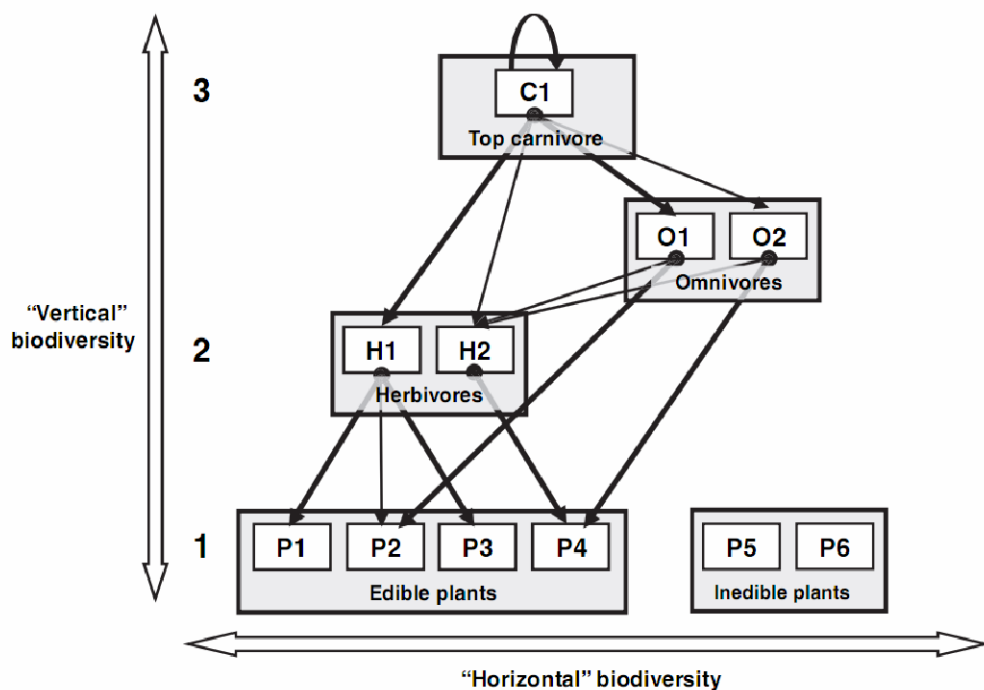
## **2. Vers une approche globale des processus écologiques dans les agroécosystèmes**

Afin de développer une agriculture qui réponde à la double ambition de l'intensification écologique (produire plus et respecter l'environnement en se basant sur des processus écologiques plutôt que sur des intrants chimiques), il est nécessaire de développer de nouveaux systèmes de culture qui incluent une biodiversité accrue et choisie. Cette biodiversité intègre des éléments directement gérés par l'agriculteur (rotations culturales, plantes de couverture associées, ...) ainsi que des équilibres entre communautés (parasites et non parasites). Il s'agit notamment i) de favoriser le contrôle des bioagresseurs par des prédateurs naturels, plutôt que d'avoir recours à des pesticides (Lewis et al., 1997), et ii) de boucler les cycles biogéochimiques, plutôt que d'avoir recours aux engrais dans des systèmes ouverts (Pearson, 2007). Les différentes fonctions écosystémiques mobilisées peuvent être classées en deux grandes catégories : celles qui modifient les cycles biogéochimiques et celles qui modifient les relations trophiques entre communautés. Afin d'avoir une réelle vision systémique, l'étude de leurs interactions est aussi nécessaire. De nouveaux cadres d'étude, d'intégration des connaissances et de modélisation doivent être construits pour prendre en compte la biodiversité fonctionnelle de l'agroécosystème et les services qu'elle peut fournir. Il ne s'agit pas de porter la biodiversité comme une solution unique, mais au contraire, d'étudier et renforcer des mécanismes écologiques de régulation pouvant s'appuyant en partie sur la biodiversité.

Cette biodiversité peut se décliner en groupes fonctionnels correspondant à différents services écosystémiques et en diversité fonctionnelle au niveau du fonctionnement trophique : diversité horizontale et verticale (Duffy et al., 2007). Le croisement de ces deux approches permet de donner un éclairage en termes de fonctions attendues et de fonctionnement. La diversité horizontale correspond à la richesse en espèces au sein d'un niveau trophique donné et la diversité verticale correspond à la diversité et à la complexité entre les réseaux trophiques (**figure 18**). La diversité horizontale est une des caractéristiques majeures des écosystèmes ; elle est liée à la taille de la niche

écologique des niveaux trophiques. La diversité verticale, impacte le fonctionnement de l'écosystème, elle sous-tend notamment le rôle de la longueur des chaînes trophiques et du degré d'omnivorie sur la biomasse et la productivité à travers les différents niveaux trophiques (Oksanen et al., 1981; Takimoto et al., 2007).

Dans cet axe de recherche, je présente l'évolution des outils de modélisation des agronomes, montrant la nécessité d'intégrer les communautés de l'agroécosystème. Enfin, je montre comment le lien entre modèles de cultures et modèles de réseaux trophiques doit permettre de simuler les propriétés émergentes des agroécosystèmes, notamment au niveau de la régulation des bioagresseurs.



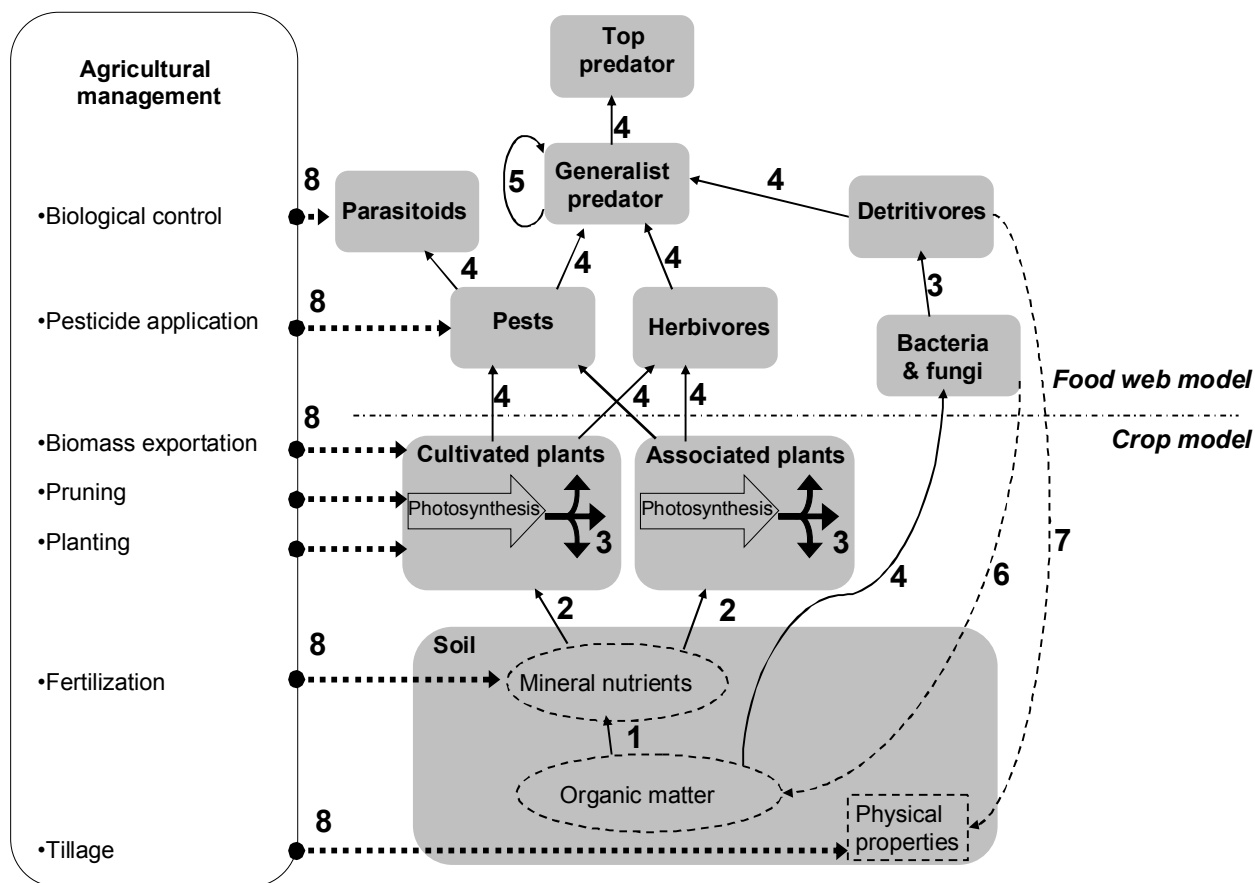
**Figure 18.** Représentation de la diversité horizontale et verticale dans un réseau trophique, d'après Duffy et al., 2007.

## 2.1. Des modèles de culture aux modèles d'agroécosystèmes

La baisse de la biodiversité peut modifier le fonctionnement et les performances des écosystèmes (Hooper et al., 2005) et de leurs services (Díaz et al., 2006). Un grand nombre d'écosystèmes sont dédiés à la production agricole (Tilman et al., 2002). Leurs fonctions (e.g. production primaire, conservation de la biodiversité, ou rétention de l'eau), et leurs propriétés comme la résilience (Cardinale et al., 2006) doivent être restaurées afin de garantir une durabilité sociale et écologique de l'environnement. Les scientifiques et les acteurs gestionnaires des écosystèmes ont besoin d'outils pour prédire les changements dans le fonctionnement des écosystèmes, afin d'aider à la conservation de leurs services pour la société (Wright et al., 2006). C'est dans ce sens que de nouveaux outils de modélisation doivent être construits pour simuler les écosystèmes naturels et les agroécosystèmes gérés par l'homme.

Jusqu'à présent, c'est la simulation du continuum sol-plante-atmosphère qui a reçu la plus grande attention des agronomes (Jones et al., 2003). Le ciblage de la représentation des flux d'eau et de nutriments sur ce continuum (Hartemink and Donald, 2005) correspondait à l'objectif de maximiser la croissance des plantes cultivées dans un contexte de simplification biologique extrême ; obtenue en utilisant massivement des pesticides pour contrôler les facteurs biologiques limitants. Ce paradigme a mené au développement de modèles de culture visant à l'optimisation des ces ressources. Les rôles des CAS (communautés aériennes et souterraines) dans le fonctionnement des agroécosystèmes (recyclage du carbone, régulation des maladies et ravageurs, pollinisation, etc.) et dans les performances du système (production de biomasse, rendement) sont connus depuis longtemps. Cependant, leurs effets sur le contrôle des ravageurs et sur les propriétés physiques des sols a été très largement ignoré dans les modèles de culture dits génériques. Ainsi, les ennemis naturels sont susceptibles de jouer un rôle majeur dans la diminution des dynamiques des populations de bioagresseurs (par exemple dans le cas du charançon du bananiers, les taux de prédation peuvent atteindre plus de 70%, Abera-Kalibata et al., 2008). Les CAS peuvent également avoir des effets importants sur des paramètres physiques ou chimiques du sol, c'est le cas des vers de terre qui peuvent remanier la structure du sol (Fonte and Six, 2010).

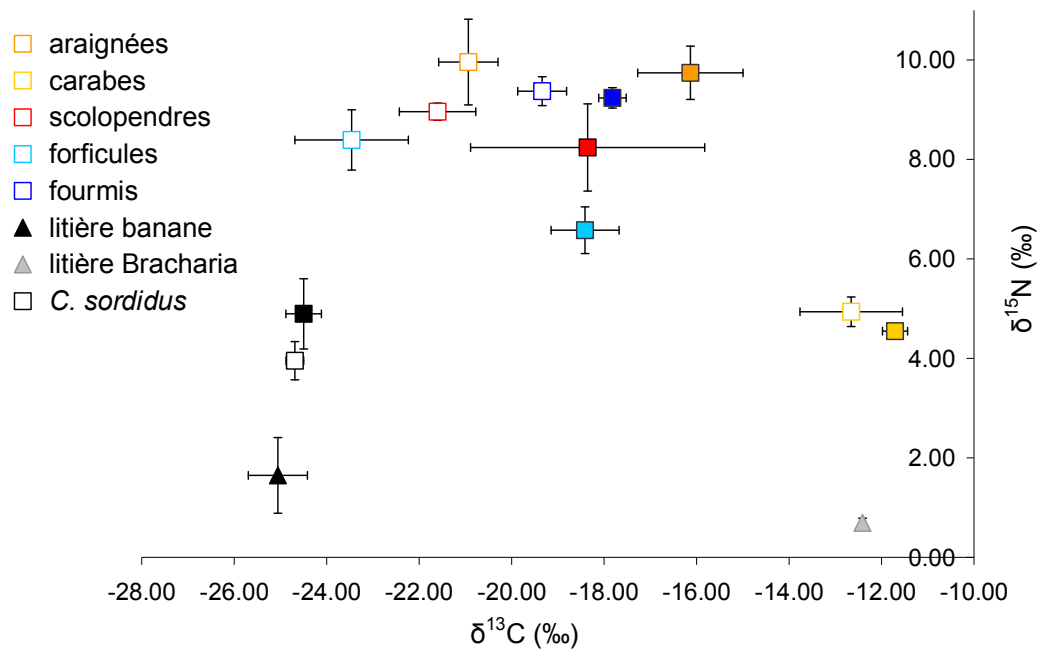
Le concept autour duquel je construis mon projet de recherche réside dans le lien entre modèles de culture, qui décrivent avec précision les relations sol-plante, et modèles de réseaux trophiques, adéquats pour décrire les interactions trophiques au sein d'une communauté (De Ruiter et al., 1994; Moore et al., 2005). Le cadre théorique et pratique de ce lien est résumé dans la **figure 19**, présentant i) le lien entre les sorties des modèles de culture utilisées comme entrées des modèles de



**Figure 19.** Proposition du concept de couplage de modèles de culture et de modèles de réseaux trophiques (d'après P21). Les n° de flèche correspondent à des flux de type : 1, minéralisation de la matière organique du sol; 2, prélèvements de nutriments par la plante; 3, allocation de biomasse aux différents organes de la plante; 4, lien de consommation directe; 5, prédation intragilde; 6, feedback chimique sur les propriétés du sol; 7, feedback physique sur les propriétés du sol; 8, action des pratiques culturales sur le système.

réseaux trophiques, ii) les feedbacks des modèles de réseaux trophiques sur le fonctionnement sol-plante (sur la structure du sol ou sur la régulation de bioagresseur par exemple), et iii) le pilotage des processus sol-plante et le pilotage des CAS par les pratiques des agriculteurs. En effet, des recherches récentes ont montré que la structure des réseaux trophiques affecte de manière très importante les performances des écosystèmes, leur stabilité (Neutel et al., 2007), et leur résilience (Cropp and Gabric, 2002). En comparaison avec les écosystèmes naturels, les agroécosystèmes sont caractérisés par un nombre limité d'espèces de plantes, et par la gestion de ces espèces et de leurs conditions de croissance.

De manière classique, les modèles de culture sont centrés sur les interactions au sein du sol et sol-plante (flèches n°1, 2 et 3 de la figure 19). Les modèles actuellement en développement prennent en compte des interactions entre plantes dans le cas de systèmes plurispécifiques (Malézieux et al., 2009) et l'impact des bioagresseurs sur le rendement (Willocquet et al., 2008). L'effet des bioagresseurs se fait par des variables de 'forçage', les interactions dynamiques entre les bioagresseurs et la plante sont rares (Tixier et al., 2006). Combiner l'effet 'bottom-up' de la plante sur les bioagresseurs (modifier la diversité végétale/basale du réseau trophique) et l'effet 'top-down' des bioagresseurs sur la plante représente sans doute la première interaction trophique prise en compte au sein des futurs modèles de culture. Le fait d'intégrer l'ensemble de ces mécanismes au sein d'une plateforme de simulation, prenant en compte les interactions avec le système décisionnel de l'agriculteur (flèches n°8 de la figure 19), permet de tester des *scenarii* de gestion du système. L'approche holistique proposée ici ne vise pas à intégrer tous les mécanismes de l'agroécosystème, mais plutôt à prendre en compte les mécanismes écologiques devant être mobilisés dans le cas d'une agriculture écologiquement intensive. Le présent projet est centré sur les relations directes de type trophique (flèches n°4 et 5 de la figure 19), et présente les connaissances à acquérir sur ces interactions pour les modéliser. Les agroécologues devront également traiter des feedback des CAS sur les propriétés du sol (flèches n°6 et 7 de la figure 19), en faisant notamment appel à l'écologie microbienne. Le concept de couplage entre modèles de système de culture et de réseau trophique proposé a une vocation générique, pas forcément au niveau des outils de simulations mais au niveau de la hiérarchisation des questions de recherche qu'il faudra développer dans le futur.



**Figure 20.** Valeurs moyennes des  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{15}\text{N}$  des organismes collectés sur sol enherbé (figurés pleins) et sur sol nu (figurés vides), montrant un déplacement de la niche trophique des prédateurs vers l'utilisation de ressources issues de la plante de couverture, d'après S1.

## 2.2. Les modèles de réseaux trophiques et la régulation des bioagresseurs

Le lien entre modèles de réseaux trophiques avec les modèles simulant les autres processus des écosystèmes est un des principaux défis pour les modélisateurs en écologie. Une représentation globale de l'écosystème et la modélisation des réseaux trophiques, liant réseaux trophiques aériens et souterrains est un objectif prioritaire (Van Der Putten et al., 2009).

La plupart des modèles de réseaux trophiques sont dérivés des équations de Lotka-Volterra, que ce soit pour les approches populationnelles (Sun and Loreau, 2009) ou stœchiométriques (Daufresne and Loreau, 2001). Afin de traiter de systèmes complexes (qui peuvent inclure de nombreux liens trophiques, entre espèces ou groupes trophiques), les chercheurs utilisent souvent des matrices de contingence pour déterminer les relations de consommation dans un réseau trophique (Allesina and Pascual, 2009). Ces matrices de contingence ne sont que rarement mesurées, sauf dans certaines études (De Ruiter et al., 1995). La détermination de ces matrices est difficile dans des écosystèmes naturels complexes, mais elle devient plus accessible dans la plupart des agroécosystèmes. Un des défis de la modélisation des réseaux trophiques des agroécosystèmes réside dans la mesure des matrices de contingence. Pour cela les isotopes stables présentent un grand potentiel (Ponsard and Ardit, 2000). Les isotopes peuvent donner un éclairage particulièrement riche dans le cas d'expérimentations de manipulation des abondances des différentes espèces présentes dans les réseaux trophiques (Wise et al., 2006). Les approches statistiques appliquées aux mesures isotopiques, permettant de calculer les gammes de contribution de différentes ressources au régime alimentaire d'un organisme donné (Benstead et al., 2006), devraient contribuer au paramétrage des modèles de réseaux trophiques. Tout cela doit amener à développer des modèles de réseaux trophiques paramétrés pour des cas concrets d'agroécosystèmes.

Nous avons initié la caractérisation du réseau trophique des bananeraies en utilisant les isotopes stables de l'azote et du carbone (stage d'Anaïs Lavigne et thèse de Grégory Mollot). L'analyse a porté sur les différences des mesures d'abondances isotopiques naturelles permettant de différencier les chaînes trophiques issues de la production primaire des bananiers (plante en C3) de celle des plantes associées (plantes en C4, *Brachiaria decubens*). La signature isotopique en  $^{13}\text{C}$  permet d'identifier la nature de la ressource basale (ici plante en C3 ou C4), et la signature en  $^{15}\text{N}$ , le niveau trophique sur la base d'une accumulation de  $^{15}\text{N}$  le long de la chaîne alimentaire. Les signatures isotopiques  $^{13}\text{C}$  et  $^{15}\text{N}$  permettent dans une certaine mesure d'évaluer respectivement la diversité horizontale et la diversité verticale. Nous avons mis en évidence, lors de l'ajout d'une plante de couverture, un déplacement de l'ensemble de la communauté de l'agroécosystème vers la signature isotopique de cette plante de couverture (**figure 20**). Cela traduit l'augmentation de la ressource

utilisée par cette communauté. Cette observation a été confirmée par des statistiques circulaires (S1). L'augmentation de la ressource potentielle des prédateurs généralistes pourrait soutenir l'augmentation de leurs populations, et donc augmenter la régulation de proies telles que le charançon du bananier. Enfin, nous avons mis en évidence une augmentation du degré d'omnivorie lors de l'ajout d'une plante de couverture, avec comme corollaire la réduction du taux de prédation intra guild. Cela traduit l'utilisation préférentielle par les prédateurs d'une ressource à des niveaux trophiques inférieurs. Cela laisse penser qu'il pourrait y avoir une régulation accrue des phytophages par les prédateurs.

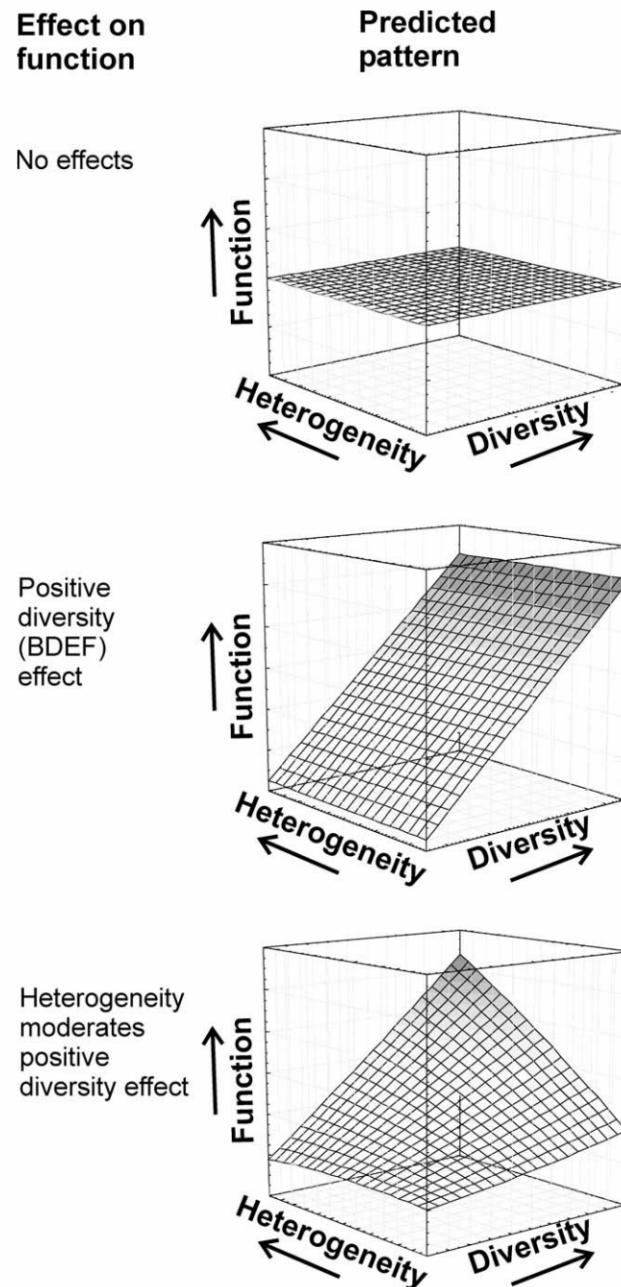
Je poursuivrai ces études avec des méthodes permettant de vérifier avec certitude les liens trophiques qui existent au sein de la communauté. Pour cela, des approches moléculaires basées sur la détection de séquences d'ADN des proies dans le tube digestif des prédateurs seront utilisées (Harper et al., 2005; Traugott et al., 2008). La complémentarité des approches isotopiques qui sont intégratives et des approches PCR qui sont au contraire très spécifiques, permet de porter un nouveau regard sur des réseaux trophiques difficiles à étudier par des observations directes, tels que les réseaux impliquant la plupart des ravageurs des cultures (Carreon-Martinez and Heath, 2010). Ces méthodes appliquées à des agroécosystèmes couvrant un large gradient d'intensification devraient permettre d'étudier la relation entre la biodiversité de ces écosystèmes, leur productivité primaire, la structure des réseaux trophiques et la régulation des bioagresseurs. Il s'agira de déterminer s'il y a redondance fonctionnelle pour la fonction de régulation des bioagresseurs. La nature de cette redondance fonctionnelle permettra d'identifier le niveau d'intensification des cultures et les éléments de biodiversité qui permettraient de maintenir un niveau satisfaisant pour cette fonction. Il sera particulièrement intéressant d'inclure dans ce gradient d'intensification des cas ayant un fort niveau de biodiversité tels que les systèmes agroforestiers. Des données quantitatives sur l'importance de ces régulations pourront être acquises directement avec l'utilisation des méthodes similaires à celles utilisées par Grégory Mollot dans son travail de thèse (exposition d'œufs) ou par des mesures des dégâts occasionnés par les bioagresseurs. De manière plus générale, cette activité de recherche pourrait se faire en lien avec les équipes qui travaillent sur les services écosystémiques de la diversité fonctionnelle, comme par exemple l'équipe du CATIE qui travaille sur les services écosystémiques à l'échelle du paysage.



### 3. Prendre en compte la dimension spatiale des interactions trophiques

L'hétérogénéité des habitats est souvent mentionnée comme favorisant la stabilité des populations, et mise en avant pour la conservation des espèces (Oliver et al.). Il a été montré que l'augmentation de l'hétérogénéité des habitats à une échelle fine réduisait la variabilité temporelle des populations de criquets dans des prairies (Kindvall, 1996). Par ailleurs, la distribution spatiale des populations dans les milieux cultivés est hétérogène ; elle suit généralement des patterns agrégatifs. Par exemple, dans des systèmes relativement homogènes comme une parcelle de luzerne, les prédateurs généralistes se distribuent de manière agrégée (Pearce and Zalucki, 2006), avec une structuration dépendante de la distance à la bordure de la parcelle et de l'abondance des proies. Gérer cette hétérogénéité spatiale des habitats et des populations représente une voie prometteuse de régulation des bioagresseurs.

La prédation d'un organisme sur un autre est dépendante de l'abondance respective des proies, des prédateurs et de la stratégie d'exploitation des proies par les prédateurs. La répartition spatiale des abondances des deux espèces modifie la disponibilité des proies. Par conséquent, il semble important de compléter les études proposées dans la première partie de mon projet de recherche sur les interactions trophiques au sein des agroécosystèmes par la prise en compte de la dimension spatiale de ces interactions dans les modèles de simulation. Au niveau théorique, il s'agit de comprendre comment l'hétérogénéité des populations et des ressources influence la colonisation des espèces et les interactions trophiques. Il s'agira de traiter conjointement du rôle de l'hétérogénéité spatiale et de celui du niveau de complexité biologique qui varient généralement ensemble. En effet, une plus grande complexité ne permet pas forcément une meilleure expression des régulations. Des résultats expérimentaux ont montré que l'augmentation de la complexité des habitats atténue les cascades trophiques : les prédateurs ont un effet réduit dans des systèmes plus complexes (Grabowski, 2004). De plus, l'augmentation de la diversité des prédateurs peut aussi réduire la cascade trophique et limiter les effets indirects des prédateurs sur les plantes à cause de l'augmentation de la prédation intragilde entre prédateurs (Finke and Denno, 2004; 2005). Il s'agira de tester si les fonctions de régulation des bioagresseurs varient avec l'organisation spatiale de la diversité végétale selon une hypothèse nulle, indépendamment, ou conjointement, comme proposé par Tylianakis et al., (2008) dans le cas de fonctions écosystémiques de systèmes prairiaux (**Figure 21**).



**Figure 21.** Hypothèses d'interaction entre biodiversité, hétérogénéité de la ressource et fonctions écosystémiques, d'après Tylianakis et al., (2008).

Au niveau pratique, il s'agit d'établir les règles d'organisation spatiale et temporelle des plantes cultivées et associées (de l'échelle parcellaire jusqu'à celle du paysage), afin de limiter les populations de bioagresseurs en maximisant la régulation des prédateurs. Ces études appliquées à des agroécosystèmes devront se faire en lien avec les autres fonctions et contraintes de ces écosystèmes cultivés : production, respect de l'environnement, compatibilité technique, sociale ou culturelle.

Je propose de structurer cette question de recherche selon deux axes : i) prise en compte des liens trophiques dans les modèles de dispersion des bioagresseurs, et ii) étude du rôle de l'hétérogénéité spatiale des ressources végétales sur l'expression des régulations trophiques des bioagresseurs.

### **3.1. Comment intégrer les interactions trophiques dans les modèles de dispersion des bioagresseurs ?**

Les outils de modélisation représentent des instruments privilégiés pour comprendre le rôle des processus biologiques menant aux distributions spatiales observées. Parmi ces processus, les comportements de recherche de nourriture (foraging behavior) sont particulièrement cruciaux. Ces comportements peuvent se décliner selon différentes stratégies d'exploration d'une ressource et d'exploitation de l'espace. On peut citer à cet égard la théorie la plus connue, celle de recherche optimale de ressource (optimal foraging behavior, (Charnov, 1976) qui permet d'expliquer de manière simple comment un prédateur exploite une ressource distribuée de manière hétérogène. Ces approches ne prennent généralement pas en compte l'espace de manière explicite (Wajnberg, 2006). Des travaux récents ont proposé des concepts pour cette prise en compte, comme la distribution optimale des prédateurs pour exploiter une proie (Viswanathan et al., 1999). Il s'agit de définir des stratégies d'allocation du temps des prédateurs à la recherche de ressource (Bénichou et al., 2006), ou de savoir à quelle fréquence il est optimal de changer de ressource (Oshanin et al., 2007).

Dans cette partie de mon projet de recherche, je propose d'intégrer dans les modèles d'épidémiologie spatiale des bioagresseurs, les groupes trophiques prédateurs, et de prendre en compte leur déplacement en milieu hétérogène ainsi que leur prédation sur les bioagresseurs. Cette partie sera réalisée en collaboration étroite avec les collègues modélisateurs du CIRAD (des unités traitant des systèmes de culture dans le département PERSYST, mais aussi d'équipes traitant explicitement de la thématique des modèles spatialisés, comme par exemple l'UPR GREEN), d'équipes françaises de l'INRA (par exemple UR PSH), mais aussi internationales comme le département 'Plant and Invertebrate Ecology' de Rothamsted Research (UK). Afin de ne pas traiter

d'un système trop complexe (dont la simulation serait vouée à l'échec), une approche prenant en compte un nombre restreint de groupes trophiques semble plus prometteuse. Il sera possible de s'appuyer sur le concept de groupe trophique (ensemble des taxa ayant un régime alimentaire similaire) implémenté dans un modèle individu centré proposé par Caron-Lormier et al. (2009). Le choix des groupes traités dans un système donné devrait se faire sur la base de leur importance dans la régulation de bioagresseurs, ou dans des interactions de type prédation intragilde.

Par exemple sur un gradient de systèmes de culture à base de bananiers, il serait possible de définir dans un premier temps les groupes trophiques qui interagissent avec un bioagresseur (tel que le charançon du bananier). A partir des travaux déjà menés, il semblerait intéressant de définir :

- deux groupes de phytophages :
  - un groupe de phytophages spécialisés sur une ressource (tels que le charançon),
  - un groupe de polyphages pouvant exploiter une plus grande gamme de plantes hôtes,
- deux groupes de prédateurs :
  - un groupe de prédateurs généralistes (incluant par exemple des fourmis),
  - un groupe de prédateurs pouvant exercer de la prédation intragilde (par exemple des araignées).

La dynamique des différentes ressources joue un rôle primordial dans la structuration des réseaux trophiques des agroécosystèmes. L'utilisation des outils de simulation du fonctionnement sol-plante permet de simuler la dynamique de production primaire des plantes cultivées et associées, et celle des résidus de culture. Le concept de liens entre modèle de culture et modèle de réseau trophique, présenté dans la **Figure 19**, trouvera ici un développement particulièrement concret. La dimension spatiale des interactions entre proies et prédateurs représente un défi pour les modélisateurs. Dans le cas du charançon du bananier, le modèle COSMOS (Vinatier et al., 2009) représente une base particulièrement prometteuse pour intégrer ces interactions. Il sera possible de faire appel à des modèles de simulation existant pour certaines espèces telles que les fourmis dont l'aspect agrégatif est particulièrement important. Les différents comportements de recherche des proies par des prédateurs généralistes pourront se faire en s'appuyant sur des formalismes existants, comme ceux éprouvés pour les fourmis (Schmolke, 2009).

### **3.2. Comment l'hétérogénéité spatiale des ressources basales des réseaux trophiques et l'hétérogénéité spatiale des populations influencent le contrôle des bioagresseurs ?**

En se basant sur le gradient de complexité des agroécosystèmes à base de bananiers, il sera possible de compléter les travaux menés sur le charançon du bananier dans les systèmes de culture intensifs de Martinique. Dans les systèmes de type 'export', l'hétérogénéité spatiale est essentiellement due à l'organisation spatiale d'une ressource alimentaire mono-spécifique (la plante cultivée) et éventuellement d'une plante associée (plante de couverture). Les réseaux trophiques soutenus par de tels systèmes sont relativement simples en termes de composition spécifique. Ce sont, par conséquent, de bons modèles biologiques pour observer des phénomènes précis tels que l'évolution du niveau de prédation intragilde au sein d'une communauté. Ces études devront être complétées avec l'étude de l'autre extrémité de ce gradient de complexité : les systèmes agroforestiers multispécifiques. Ces systèmes sont complexes dans leur diversité horizontale et verticale et dans leur composante spatiale. Des études sur cette thématique sont actuellement menées dans des systèmes semi-intensifs (caféiers), et montrent l'importance de l'organisation spatiale des ressources et des prédateurs sur la régulation de bioagresseurs (Perfecto and Vandermeer, 2008). L'utilisation du concept proposé dans la **figure 19** et la spatialisation de certaines composantes du système sol-plante permettront d'étudier les interactions entre des motifs spatiaux, la dynamique des bioagresseurs, et l'évolution de la structure des groupes trophiques.

De manière plus générale, l'organisation spatiale des ressources basales du réseau trophique d'un agroécosystème comprend la gestion de la diversité végétale (diversité horizontale au niveau des producteurs primaires) et des ressources de type détritique (matières organiques allogènes ou exogènes). Dans le cas des agroécosystèmes à base de bananiers, les modes de gestion de cette hétérogénéité spatiale devront prendre en compte les contraintes et la logique de production de chaque type d'exploitation. Par exemple la mécanisation des parcelles pourrait permettre la constitution de zone de maintien des CAS (sillon ou andain dans les rangs de culture). A l'opposé, dans les systèmes de culture plurispécifiques et extensifs, c'est l'agencement dans l'espace et dans le temps des différentes plantes cultivées qui semble à privilégier. L'accent pourrait également être mis sur le rôle de l'organisation spatiale des prédateurs directs. Il pourrait, par exemple, être intéressant d'utiliser des méthodes de radio-télémétrie afin d'identifier les patterns des fourmilières de parcelles. L'utilisation d'appâts marqués permettrait d'identifier les fourmilières et leur zone d'influence. Il a été montré que la présence de plusieurs dômes dans une fourmilière améliore l'exploitation de ressource quand celle-ci est distribuée de manière aléatoire (Schmolke, 2009). Les facteurs expliquant l'agrégation de ces populations devront également être pris en compte

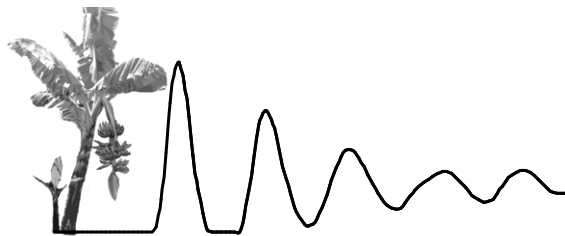
(Depickère et al., 2004). Cette question pourrait trouver un champ d'application dans le domaine de l'optimisation d'habitats favorables aux fourmilières, favorisant la régulation biologique d'un ravageur comme le charançon du bananier. *In fine*, il s'agit de comprendre comment favoriser les cascades trophiques où les bioagresseurs seraient contrôlés de manière satisfaisante.

## **Conclusion générale**

Mon projet est au croisement de l'agronomie des systèmes multi-espèces, de l'épidémiologie spatiale des bioagresseurs, et de l'écologie des communautés. Il s'intéresse à des questions d'écologie générale, comme le rôle de l'espace dans les interactions au sein d'un réseau trophique (Loreau and Holt, 2004), ou l'effet de la productivité, de l'organisation et de la diversité des milieux sur la longueur des chaînes trophiques (Lindeman, 1942). En étant centré sur les fonctions écosystémiques de régulation des bioagresseurs, il vise également des applications réalistes chez les agriculteurs, qu'ils soient industriels ou dans de petites exploitations familiales.

Au niveau institutionnel, ce projet devrait renforcer le positionnement du CIRAD dans le domaine de l'écologie appliquée et de la modélisation. Il doit également s'appuyer sur l'étude de systèmes biologiques contrastés (des monocultures intensives aux systèmes multi-espèces extensifs), ce qui impliquera un rapprochement des équipes des Antilles françaises avec des centres de recherche internationaux comme le CATIE ou le CARBAP.

## REFERENCES







## RÉFÉRENCES

- Abera-Kalibata, A.M., Gold, C.S. and Van Driesche, R., 2008. Experimental evaluation of the impacts of two ant species on banana weevil in Uganda. *Biological Control*, 46:147-157.
- Allesina, S. and Pascual, M., 2009. Food web models: A plea for groups. *Ecology Letters*, 12:652-662.
- Altieri, M.A., 1989. Agroecology: A new research and development paradigm for world agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 27:37-46.
- Bénichou, O., Coppey, M., Moreau, M. and Voituriez, R., 2006. Intermittent search strategies: When losing time becomes efficient. *Europhysics Letters*, 75:349-354.
- Benstead, J.P., March, J.G., Fry, B., Ewel, K.C. and Pringle, C.M., 2006. Testing isosource: Stable isotope analysis of a tropical fishery with diverse organic matter sources. *Ecology*, 87:326-333.
- Bockstaller, C., Girardin, P. and Van Der Werf, H.M.G., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *European Journal of Agronomy*, 7:261-270.
- Bockstaller, C., Guichard, L., Makowski, D., Aveline, A., Girardin, P. and Plantureux, S., 2008. Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28:139-149.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M. and Delecolle, R., 1998. STICS: A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18:311-346.
- Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B. and Justes, E., 2002. STICS: A generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie*, 22:69-92.
- Cardinale, B.J., Srivastava, D.S., Duffy, J.E., Wright, J.P., Downing, A.L., Sankaran, M. and Jouseau, C., 2006. Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems. *Nature*, 443:989-992.
- Caron-Lormier, G., Bohan, D.A., Hawes, C., Raybould, A., Haughton, A.J. and Humphry, R.W., 2009. How might we model an ecosystem? *Ecological Modelling*, 220:1935-1949.
- Carreon-Martinez, L. and Heath, D.D., 2010. Revolution in food web analysis and trophic ecology: Diet analysis by DNA and stable isotope analysis. *Molecular Ecology*, 19:25-27.
- Charnov, E.L., 1976. Optimal foraging, the marginal value theorem. *Theoretical Population Biology*, 9:129-136.
- Cropp, R. and Gabric, A., 2002. Ecosystem adaptation: Do ecosystems maximize resilience? *Ecology*, 83:2019-2026.
- Daufresne, T. and Loreau, M., 2001. Ecological stoichiometry, primary producer-decomposer interactions, and ecosystem persistence. *Ecology*, 82:3069-3082.
- De Ruiter, P.C., Neutel, A.M. and Moore, J.C., 1994. Modelling food webs and nutrient cycling in agro-ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 9:378-383.
- De Ruiter, P.C., Neutel, A.M. and Moore, J.C., 1995. Energetics, patterns of interaction strengths, and stability in real ecosystems. *Science*, 269:1257-1260.
- Depickère, S., Fresneau, D. and Deneubourg, J.L., 2004. A basis for spatial and social patterns in ant species: Dynamics and mechanisms of aggregation. *Journal of Insect Behavior*, 17:81-97.
- Díaz, S., Fargione, J., Chapin, F.S. and Tilman, D., 2006. Biodiversity loss threatens human well-being. *PLoS Biology*, 4:1300-1305.
- Dogliotti, S., Rossing, W.A.H. and Van Ittersum, M.K., 2003. ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *European Journal of Agronomy*, 19:239-250.

- Dogliotti, S., Rossing, W.A.H. and Van Ittersum, M.K., 2004. Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income: A case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agricultural Systems*, 80:277-302.
- Duffy, J.E., Cardinale, B.J., France, K.E., McIntyre, P.B., Thébault, E. and Loreau, M., 2007. The functional role of biodiversity in ecosystems: Incorporating trophic complexity. *Ecology Letters*, 10:522-538.
- Ewel, J.J., 1999. Natural systems as models for the design of sustainable systems of land use. *Agroforestry Systems*, 45:1-21.
- Finke, D.L. and Denno, R.F., 2004. Predator diversity dampens trophic cascades. *Nature*, 429:407-410.
- Finke, D.L. and Denno, R.F., 2005. Predator diversity and the functioning of ecosystems: The role of intraguild predation in dampening trophic cascades. *Ecology Letters*, 8:1299-1306.
- Fonte, S.J. and Six, J., 2010. Earthworms and litter management contributions to ecosystem services in a tropical agroforestry system. *Ecological Applications*, 20:1061-1073.
- Grabowski, J.H., 2004. Habitat complexity disrupts predator-prey interactions but not the trophic cascade on oyster reefs. *Ecology*, 85:995-1004.
- Harper, G.L., King, R.A., Dodd, C.S., Harwood, J.D., Glen, D.M., Bruford, M.W. and Symondson, W.O.C., 2005. Rapid screening of invertebrate predators for multiple prey DNA targets. *Molecular Ecology*, 14:819-827.
- Hartemink, A.E. and Donald, L.S., 2005. Nutrient Stocks, Nutrient Cycling, and Soil Changes in Cocoa Ecosystems: A Review. *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 227-253.
- Hooper, D.U., Chapin Iii, F.S., Ewel, J.J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J.H., Lodge, D.M., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setaälä, H., Symstad, A.J., Vandermeer, J. and Wardle, D.A., 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75:3-35.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J. and Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18:235-265.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M. and Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18:267-288.
- Kindvall, O., 1996. Habitat heterogeneity and survival in a bush cricket metapopulation. *Ecology*, 77:207-214.
- Laurens, A., 2008. Etude spatialisée des flux et du bilan de l'azote en bananeraie enherbée : optimisation de la gestion du couvert et de la fertilisation par modélisation. Rapport de stage, Agro-Paris-Tech.
- Lewis, W.J., Van Lenteren, J.C., Phatak, S.C. and Tumlinson Iii, J.H., 1997. A total system approach to sustainable pest management. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94:12243-12248.
- Lindeman, R.L., 1942. The trophic-dynamic aspect of Ecology. *Ecology*, 23:399-413.
- Loreau, M. and Holt, R.D., 2004. Spatial flows and the regulation of ecosystems. *American Naturalist*, 163:606-615.
- Loyce, C., Rellier, J.P. and Meynard, J.M., 2002. Management planning for winter wheat with multiple objectives (1): The BETHA system. *Agricultural Systems*, 72:9-31.
- Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., de Tourdonnet, S. and Valantin-Morison, M., 2008. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28.

- Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., De Tourdonnet, S. and Valantin-Morison, M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: Concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29:43-62.
- Meynard, J.M., Doré, T. and Habib, R., 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 87:223-236.
- Moore, J.C., McCann, K. and De Ruiter, P.C., 2005. Modeling trophic pathways, nutrient cycling, and dynamic stability in soils. *Pedobiologia*, 49:499-510.
- Neutel, A.M., Heesterbeek, J.A.P., Van De Koppel, J., Hoenderboom, G., Vos, A., Kaldeway, C., Berendse, F. and De Ruiter, P.C., 2007. Reconciling complexity with stability in naturally assembling food webs. *Nature*, 449:599-602.
- Oksanen, L., Fretwell, S., Arruda, J. and Niemala, P., 1981. Exploitation ecosystems in gradients of primary productivity. *The American Naturalist*, 118:240-261.
- Oliver, T., Roy, D.B., Hill, J.K., Brereton, T. and Thomas, C.D., 2007. Heterogeneous landscapes promote population stability. *Ecology Letters*, 10:473-484.
- Oshanin, G., Wio, H.S., Lindenberg, K. and Burlatsky, S.F., 2007. Intermittent random walks for an optimal search strategy: One-dimensional case. *Journal of Physics Condensed Matter*, 19.
- Pascual, C., Garcia-Abril, A., Garcia-Montero, L.G., Martin-Fernandez, S. and Cohen, W.B., 2008. Object-based semi-automatic approach for forest structure characterization using lidar data in heterogeneous *Pinus sylvestris* stands. *Forest Ecology and Management*, 255:3677-3685.
- Pearce, S. and Zalucki, M.P., 2006. Do predators aggregate in response to pest density in agroecosystems? Assessing within-field spatial patterns. *Journal of Applied Ecology*, 43:128-140.
- Pearson, C.J., 2007. Regenerative, semiclosed systems: A priority for twenty-first-century agriculture. *BioScience*, 57:409-418.
- Perfecto, I. and Vandermeer, J., 2008. Spatial pattern and ecological process in the coffee agroforestry system. *Ecology*, 89:915-920.
- Ponsard, S. and Ardit, R., 2000. What can stable isotopes ( $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ ) tell about the food web of soil macro-invertebrates? *Ecology*, 81:852-864.
- Ramos, M.E., Benatez, E., Garcia, P.A. and Robles, A.B., 2007. Cover crops under different managements vs. frequent tillage in almond orchards in semiarid conditions: Effects on soil quality. *Applied Soil Ecology*, 44:6-14.
- Ripoche, A., Celette, F., Cinna, J.P. and Gary, C., 2007. Design of intercrop management plans to fulfil production and environmental objectives in vineyards. *European Journal of Agronomy*, 32:30-39.
- Rossing, W.A.H., Meynard, J.M. and Van Ittersum, M.K., 1997. Model-based explorations to support development of sustainable farming systems: Case studies from France and the Netherlands. *European Journal of Agronomy*, 7:271-283.
- Savary, S., Teng, P.S., Willocquet, L. and Nutter Jr, F.W., 2006. Quantification and modeling of crop losses: A review of purposes. In: D.B. Alfen (Editor), *Annual Review of Phytopathology*, pp. 89-112.
- Schmolke, A., 2009. Benefits of dispersed central-place foraging: An individual-based model of a polydomous ant colony. *American Naturalist*, 173:772-778.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M. and Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18:289-307.
- Sun, C. and Loreau, M., 2009. Dynamics of a three-species food chain model with adaptive traits. *Chaos, Solitons & Fractals*, 41:2812-2819.
- Takimoto, G., Miki, T. and Kagami, M., 2007. Intraguild predation promotes complex alternative states along a productivity gradient. *Theoretical Population Biology*, 72:264-273.

- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R. and Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418:671-677.
- Tixier, P., Risede, J.M., Dorel, M. and Malézieux, E., 2006. Modelling population dynamics of banana plant-parasitic nematodes: A contribution to the design of sustainable cropping systems. *Ecological Modelling*, 198:321-331.
- Traugott, M., Bell, J.R., Broad, G.R., Powell, W., Van Veen, F.J.F., Vollhardt, I.M.G. and Symondson, W.O.C., 2008. Endoparasitism in cereal aphids: Molecular analysis of a whole parasitoid community. *Molecular Ecology*, 17:3928-3938.
- Tylianakis, J.M., Rand, T.A., Kahmen, A., Klein, A.M., Buchmann, N., Perner, J. and Tscharntke, T., 2008. Resource heterogeneity moderates the biodiversity-function relationship in real world ecosystems. *PLoS Biology*, 6:0947-0956.
- Van Der Putten, W.H., Bardgett, R.D., De Ruiter, P.C., Hol, W.H.G., Meyer, K.M., Bezemer, T.M., Bradford, M.A., Christensen, S., Eppinga, M.B., Fukami, T., Hemerik, L., Molofsky, J., Schöndler, M., Scherber, C., Strauss, S.Y., Vos, M. and Wardle, D.A., 2009. Empirical and theoretical challenges in aboveground-belowground ecology. *Oecologia*, 161:1-14.
- Vereijken, P., 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy*, 7:37-43.
- Vinatier, F., Tixier, P., Le Page, C., Duyck, P.F. and Lescourret, F., 2009. COSMOS, a spatially explicit model to simulate the epidemiology of *Cosmopolites sordidus* in banana fields. *Ecological Modelling*, 220:2244-2254.
- Violle, C., Garnier, E., Lecoœur, J., Roumet, C., Pothier, C., Blanchard, A. and Navas, M.L., 2009. Competition, traits and resource depletion in plant communities. *Oecologia*, 160:747-755.
- Viswanathan, G.M., Buldyrev, S.V., Havlin, S., Da Luz, M.G.E., Raposo, E.P. and Stanley, H.E., 1999. Optimizing the success of random searches. *Nature*, 401:911-914.
- Wajnberg, A., 2006. Time allocation strategies in insect parasitoids: From ultimate predictions to proximate behavioral mechanisms. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 60:589-611.
- Wilocquet, L., Aubertot, J.N., Lebard, S., Robert, C., Lannou, C. and Savary, S., 2008. Simulating multiple pest damage in varying winter wheat production situations. *Field Crops Research*, 107:12-28.
- Wise, D.H., Moldenhauer, D.M. and Halaj, J., 2006. Using stable isotopes to reveal shifts in prey consumption by generalist predators. *Ecological Applications*, 16:865-876.
- Wright, J.P., Naeem, S., Hector, A., Lehman, C., Reich, P.B., Schmid, B. and Tilman, D., 2006. Conventional functional classification schemes underestimate the relationship with ecosystem functioning. *Ecology Letters*, 9:111-120.

## Abstract

In the context of a fast changing agriculture, the design of innovative cropping systems that address farmers and society issues is an important challenge for agronomists. Agriculture should address the dual issue of been productive and to respect environment. Designing innovative cropping systems rely on i) cognitive researches, that aim at understanding agroecosystems processes, and ii) the integration of these processes to assess these systems on multiple criteria.

I developed modelling tools that allow integrating existing knowledge on banana-based agroecosystems, to identify gap of knowledge, and to provide driving tools that participate to the definition of more sustainable cropping systems. Modelling tools simulate the biophysical functioning of banana-based agroecosystems, including some of their specificities such as the semi-perennial nature of banana crops and the fact to account for population dynamics of pest (plant-parasitic nematodes and banana weevil). These models were linked to evaluation tools to assess environmental risks (pesticide pollution risk), allowing the assessment agronomic, economic and environmental performances of existing or innovative cropping systems. These tools were used to assist the definition of prototypes of cropping systems, first by assessing a broad range of farmer's decision rules and then by optimizing the most promising combinations.

The research project described here deals with the role of biodiversity in the productivity and stability of cropping systems. I propose to use food web models to account for the biological complexity of agroecosystems, including interactions between plants, with pests, natural enemies, and 'non-productive' communities. On a methodological point of view, linking crop models (used by agronomist) and food web models (used by ecologist) should provide a comprehensive framework to simulate soil-plant-atmosphere continuum, natural control of crop pest, and feedbacks of different communities on soil properties. This framework should allow linking farmer's practices (including the decisional aspects) with emerging properties of this complex system. The second part of this project concerns the understanding of the role of spatial organization of cropping systems on biological regulation of crop pests. It aims at understanding how spatial heterogeneity and diversity of resources influence dispersal and biological control of crop pests.

## Résumé

Dans un contexte de mutation rapide de l'agriculture, la conception de systèmes de culture répondants aux nouvelles exigences des agriculteurs et de la société est une nécessité. L'agriculture doit répondre au double enjeu : être productive et respecter l'environnement. La conception de systèmes de culture innovants repose à la fois sur i) des recherches cognitives, visant à comprendre les processus impliqués dans l'agroécosystème et ii) leur intégration dans des systèmes complexes et l'évaluation multicritère de ces systèmes.

J'ai développé une approche de modélisation permettant d'intégrer les connaissances existantes sur le fonctionnement des agroécosystèmes à base de bananiers, d'identifier les connaissances manquantes, et de fournir des outils de pilotage afin de permettre la définition de systèmes de culture durables. Les outils de modélisation développés simulent le fonctionnement biophysique de l'agroécosystème, incluant certaines spécificités, comme la prise en compte d'un peuplement cultivé hétérogène (caractère semi-pérenne des bananiers) et la dynamique des bioagresseurs (nématodes phytoparasites et charançons). Ces modèles ont été couplés à des outils d'évaluation des risques environnementaux (risque de pollution par les pesticides), permettant *in fine*, d'évaluer systèmes de culture existants ou innovants sur la base de critères de performances agronomiques, économiques et environnementales. Afin d'assister le prototypage de systèmes de culture innovants, ces outils de modélisation ont été utilisés afin de tester un grand nombre de règles de décisions des agriculteurs et d'optimiser les combinaisons les plus prometteuses.

Mon projet de recherche traite de la question du rôle de la diversité biologique dans la productivité et la stabilité des systèmes de culture. Je propose de mobiliser des modèles de réseaux trophiques afin de prendre en compte la complexification biologique des systèmes cultivés. Au niveau méthodologique, lier les modèles de culture utilisés par les agronomes, avec les modèles de réseaux trophiques utilisés par les écologues, représente un cadre adapté pour simuler le fonctionnement du continuum sol-plante-atmosphère, la régulation biologique des bioagresseurs, et les feedbacks des différentes communautés sur les propriétés du sol. Ce cadre devrait permettre de faire le lien entre les pratiques culturales des agriculteurs, incluant la composante économique et décisionnelle, avec les propriétés émergentes de ces systèmes complexes. La seconde partie de ce projet de recherche concerne l'étude de la dimension spatiale dans la régulation des bioagresseurs. Il s'agit notamment d'étudier comment l'hétérogénéité spatiale et la diversité des ressources influencent la dispersion et la régulation des bioagresseurs par prédation.